



# **Étude de la performance des radars hautes-fréquences CODAR et WERA pour la mesure des courants marins en présence partielle de glace de mer**

Mémoire présenté  
dans le cadre du programme de maîtrise en Océanographie  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR  
© Emna KAMLI

**29 SEPTEMBRE 2014**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



**Composition du jury :**

**Urs NEUMEIER, président du jury, ISMER-UQAR**

**Cédric CHAVANNE, directeur de recherche, ISMER-UQAR**

**Dany DUMONT, codirecteur de recherche, ISMER-UQAR**

**Céline QUENTIN, examinateur externe, Université de Toulon**

Dépôt initial le 21 juillet 2014

Dépôt final le 29 septembre 2014



Je dédie ce mémoire à l'âme de  
mon cher papa. Qui je sentais toujours  
à mes côtés malgré qu'il nous ait quitté  
il y a longtemps. Je t'aime papa...



## ***REMERCIEMENTS***

En préambule, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont épaulée et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens tout d'abord à remercier Mr Urs Neumeier et Mme Céline Quentin d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie le gouvernement tunisien à travers la Mission Universitaire de la Tunisie à Montréal, le FQRNT, Développement Économique Canada pour les régions du Québec et Québec-Océan pour leur soutien financier.

Je remercie chaleureusement et exprime ma très vive reconnaissance à M. Cédric Chavanne. Un grand merci Cédric, pour la confiance que tu m'avais donnée dès le début. Je suis vraiment chanceuse de t'avoir comme encadreur. Ce que j'apprécie toujours en toi, c'est de pouvoir travailler à mon aise, de me transmettre toujours une certaine énergie positive après chaque discussion. Ainsi je me suis sentie responsable, autonome et les travaux avançaient d'une manière vraiment fluide. Tu étais très patient avec moi, et répondais à toutes mes questions parfois très nombreuses. Les mots ne pourront jamais décrire toute ma gratitude et ma reconnaissance. Merci aussi pour ta grande qualité d'encadrement et de m'avoir fournie, des explications et des conseils précieux tout au long de cette maîtrise.



Un énorme merci également à M. Dany Dumont, mon co-directeur. Merci Dany de m'avoir fournie, des informations si utiles et d'avoir facilité mon travail. Merci pour tes remarques et tes conseils qui sont toujours à leur place. Merci aussi pour ta grande contribution pour l'analyse des données de glace et tes idées toujours enrichissantes. Je te remercie vivement.

Je remercie vivement Urs Neumeier pour les données de vagues prédites par le modèle GENER. Je voudrais également bien remercier Simon Senneville et Simon St-Onge Drouin pour les données de vent du modèle GEM et Marion Chavanne et Pêches et Océans Canada pour les données de la bouée IML-4.

Mes remerciements sont adressés aussi à James Caveen. Je le remercie pour son aide, sa disponibilité et son assistance technique précieuse. Merci James!

Je remercie vivement tout le personnel de l'ISMER, Jean-Pierre Gagné, Martine, Brigitte et Kathy, pour leur assistance administrative.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma grande famille et à la famille de mon mari, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. Je remercie particulièrement ma chère mère et ma sœur pour leur patience et leurs encouragements. C'est avec plein d'émotion et de gratitude, que je tiens à remercier mon mari et complice de tous les jours, Housseem, qui a été toujours à mes côtés malgré la distance et notre fameux combat contre le décalage horaire embêtant! Merci Housseem pour tous ce que tu fais pour m'encourager et me soutenir, merci aussi pour ta patience, ton écoute et ta compréhension qui ont été indispensables à la réalisation de ce projet.

## ***RÉSUMÉ***

Les radars hautes-fréquences (RHF) mesurent les courants marins de surface avec une portée pouvant atteindre 200 kilomètres et une résolution de l'ordre du kilomètre. Cette étude a pour but de caractériser la performance des RHF, en terme de couverture spatiale, pour la mesure des courants de surface en présence partielle de glace de mer. Pour ce faire, les mesures des courants de deux radars de type CODAR sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, et d'un radar de type WERA sur la rive nord, prises pendant l'hiver 2013, ont été utilisées. Dans un premier temps, l'aire moyenne journalière de la zone où les courants sont mesurés par chaque radar a été comparée à l'énergie des vagues de Bragg calculée à partir des données brutes d'accélération fournies par une bouée mouillée dans la zone couverte par les radars. La couverture des CODARs est dépendante de la densité d'énergie de Bragg, alors que la couverture du WERA y est pratiquement insensible. Un modèle de fetch appelé GENER a été forcé par la vitesse du vent prédite par le modèle GEM d'Environnement Canada pour estimer la hauteur significative ainsi que la période modale des vagues. À partir de ces paramètres, la densité d'énergie des vagues de Bragg a été évaluée pendant l'hiver à l'aide du spectre théorique de Bretschneider. Ces résultats permettent d'établir la couverture normale de chaque radar en absence de glace de mer. La concentration de glace de mer, prédite par le système canadien opérationnel de prévision glace-océan, a été moyennée sur les différents fetchs du vent selon la direction moyenne journalière des vagues prédites par GENER. Dans un deuxième temps, la relation entre le ratio des couvertures journalières obtenues pendant l'hiver 2013 et des couvertures normales de chaque radar d'une part, et la concentration moyenne journalière de glace de mer d'autre part, a été établie. Le ratio des couvertures décroît avec l'augmentation de la concentration de glace de mer pour les deux types de radars, mais pour une concentration de glace de 20% la couverture du WERA est réduite de 34% alors que pour les CODARs elle est réduite de 67%. Les relations empiriques établies entre la couverture des RHF et les paramètres environnementaux (vent et glace de mer) permettront de prédire la couverture que pourraient fournir des RHF installés dans d'autres régions soumises à la présence saisonnière de glace de mer.

Mots clés : radars hautes fréquences- CODAR- WERA- couverture radar- vagues- glace de mer



## ***ABSTRACT***

High-frequency radars (HFR) are shore-based remote sensing system designed to map surface currents over a wide area with a range up to 200 km and a resolution of the order of one kilometer. The aim of this study is to characterize the performance of HFRs, in terms of spatial coverage, for measuring ocean currents in partially ice-covered waters in the Lower St. Lawrence Estuary (LSLE) during winter 2013. Current measurements of two CODAR HFRs installed on the south shore of the LSL and a WERA HFR on the north shore were used. As a first step, each HFR's daily-averaged area of currents coverage has been compared to the Bragg wave energy density calculated from the raw acceleration data obtained from a buoy moored in the field of radar coverage. CODARs coverage was dependent on the Bragg energy density, while WERAs coverage was virtually insensitive. A fetch model (GENER) has been forced with wind speed predicted by the GEM model of Environment Canada has been used to force to estimate significant wave height and peak period in order to calculate the wave energy density at the Bragg frequencies during winter 2013 using the theoretical Bretschneider's spectrum. These results establish the normal coverage of each HFR in ice-free conditions. Sea ice concentration, predicted by the Canadian operational ice-ocean forecasting system, was averaged over wind fetches, depending on the daily mean wave direction predicted by GENER. As a second step, the relationship between the ratio of daily coverage obtained during winter 2013 and the normal coverage of each HFR on the one hand, and the daily-averaged sea ice concentration on the other hand, has been established. The ratio of daily coverage decreases with increasing sea ice concentration for both HFR types, but the decrease is faster for CODAR than for WERA HFR. For example, for an ice concentration of 20% WERA radar coverage is reduced by 34% while CODAR coverage is reduced by 67%. Empirical relationships between the HFR coverage and environmental parameters (wind and sea ice) will allow predicting coverage that could be provided by HFR installed in other seasonally ice-covered waters.

Keywords: High frequency radar-CODAR-WERA-radars coverage-waves-sea ice



## *TABLE DES MATIÈRES*

REMERCIEMENTS .....	ix
RÉSUMÉ .....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES .....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xxiii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxv
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
Chapitre 1 EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF HIGH FREQUENCY CODAR AND WERA RADARS TO MEASURE OCEAN CURRENTS IN PARTIALLY ICE-COVERED WATERS.....	17
1.1. INTRODUCTION .....	17
1.2. STUDY AREA AND RADAR SYSTEMS .....	20
1.2.1. The area .....	20
1.2.2. HFRs .....	21
1.3. DATA AND METHODOLOGY .....	23
1.3.1. Oceanographic and meteorological data .....	23
1.3.2. Data processing .....	23
1.4. RESULTS.....	25

1.4.1.	HFR coverage compared to ice concentration.....	25
1.4.2.	Effect of wind and waves on HFR performance.....	27
1.5.	DISCUSSION AND CONCLUSION .....	45
1.5.1.	Parameters affecting both HFR types measurements .....	45
1.5.2.	HFR types differences .....	45
CONCLUSION GÉNÉRALE .....		47
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		51

## ***LISTE DES TABLEAUX***

Table 1 : HFR characteristics.....	22
Table 2 : Coefficients of the radar coverages nonlinear least-square fit to Bragg energy densities for the three HFRs.....	33
Table 3 : Correction coefficients to apply to predicted Bragg energy densities for the three HFRs .....	37





## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Carte montrant les positions des radars HF répertoriés par IOOS (Integrated Ocean Observing System) sur les côtes américaines et eurasiennes (modifiée de <a href="http://www.ioos.noaa.gov">http://www.ioos.noaa.gov</a> ) .....	2
Figure 2 : Carte de la zone d'étude avec l'emplacement des radars HF et de la bouée IML-4 (insert en bas à droite). I.B. : Îles du Bic. P.M. : Péninsule Manicouagan .....	4
Figure 3 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement des radars HF. $\lambda_{EM}$ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique émise par le radar. $\lambda_w$ : longueur d'onde des vagues de Bragg. $\delta$ : la profondeur sur laquelle s'étend l'onde électromagnétique (Équation 1) .....	7
Figure 4 : Exemple d'une carte Distance- Fréquence Doppler produite par un radar HF (Dzvonkovskaya et al. 2009) .....	8
Figure 5 : Photos des deux types d'antennes de réception (à gauche un CODAR et à droite un WERA, photos prises par Cédric Chavanne) .....	11
Figure 6 : Cartes de courants mesurés par le CODAR de STF en présence de glace de mer (à gauche) le 31 Janvier 2013 à 15:00 UTC et en absence de glace de mer (à droite) le 15 Mars 2013 à 20:00 UTC. La concentration de glace de mer provient du système canadien opérationnel de prévision glace-océan.....	14
Figure 7 : Map showing the study area and HFR locations with their corresponding polar grids and predicted waves positions .....	22
Figure 8 : Current map of the STF CODAR for 13 February 2013 at 12:00 UTC showing some measurements where the forecasting system predicts high ice concentration.....	24
Figure 9 : Example map of PAP daily coverage index with contour of 50% (black line) .....	25

Figure 10 : HFR coverage versus local ice concentration for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). The HFR maximum coverage is shown by the red line .....	26
Figure 11 : HFR coverage versus Bragg energy density for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel) .....	28
Figure 12 : Comparison between the average measured spectrum in blue and the theoretical spectrum of Bretschneider in red. The standard deviation of the measured spectrum is shown in light gray.....	30
Figure 13 : Observed Bragg energy densities from IML-4 buoy versus estimated Bragg energy densities from theoretical two-parameter wave Bretschneider's spectrum, with correlation coefficients squared ( $R^2$ ) obtained for each site.....	31
Figure 14 : HFR coverage versus Bragg energy density calculated from theoretical spectrum for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). Red lines are the fitted relationships (Equation 6 and Table 2) .....	32
Figure 15 : Predicted significant wave heights (top panel) and peak periods (bottom panel) time series for the three HFR sites PAP (in blue), STF (in red) and PAO (in green).....	34
Figure 16 : Comparison between predicted (in blue) and measured (in red) significant wave heights (top panel) and peak periods (bottom panel), with HFRs Bragg periods shown with dashed lines (PAP: blue, STF: red, PAO: green).....	35
Figure 17 : Observed versus predicted Bragg energy densities for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). Linear fitted relationships are shown in red and the 1:1 lines are shown in green .....	36
Figure 18 : Examples of two different wind fetches (in blue and yellow) determined for STF maximum radar coverage (in red).....	38
Figure 19 : Example of a Canadian Ice Service chart showing open water (blue) areas in the LSLE with less than one tenth ice concentration where frazil ice might be present. The field of experiment is shown by the black rectangle .....	39
Figure 20 : CODARs (a,b,c,d) and WERA (e,f) HFR normalized coverage ( $\Gamma$ ) versus ice concentration before (left) and after (right) averaging ice data over wind fetches. Least-square fitted linear relationships are shown by red lines .....	41

Figure 21 : As Figure 20 (right) with frazil-free (squares) or possibility of frazil (circles) and wind direction (color) indicated. Least-square fitted linear relationship is shown by blue lines (Equation 8) .....43

Figure 22 : As Figure 21 but for WERA HFR (PAO). Least-square fitted linear relationship is shown by the blue line (Equation 9).....44



## ***LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES***

<b>CODAR</b>	Coastal Ocean Dynamics Applications Radars, un modèle de radar HF.
<b>EM</b>	Electromagnetic.
<b>FMCW</b>	Frequency-Modulated Continuous Wave.
<b>FMiCW</b>	Frequency-Modulated interrupted Continuous Wave.
<b>GEM</b>	Global Environmental Multiscale, un modèle atmosphérique d'Environnement Canada.
<b>HF</b>	High Frequency / Haute Fréquence
<b>HFR</b>	High Frequency Radar.
<b>IML-4</b>	nom de la bouée de l'Institut Maurice Lamontagne située au large de Rimouski.
<b>IOOS</b>	Integrated Ocean Observing System.
<b>LSLE</b>	Lower Saint Lawrence Estuary.
<b>OGSL</b>	Observatoire Global du Saint-Laurent.
<b>PAB</b>	Pointe-à-Boisvert.
<b>PAO</b>	Pointe-aux-Outardes.
<b>PAP</b>	Pointe-au-Père.
<b>RHF</b>	Radar Haute Fréquence.

<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio.
<b>STF</b>	Sainte-Flavie.
<b>WERA</b>	Wellen RAdar, un modèle de radar HF.
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization.

## ***LISTE DES SYMBOLES***

$\delta$	La profondeur sur laquelle s'étend l'onde EM émise par le radar HF.
$\lambda_{EM}, \lambda$	Longueur d'onde EM émise par le radar HF.
$\lambda_w$	Longueur d'onde des vagues de Bragg.
$\epsilon_r$	Constante diélectrique relative de l'eau.
$\sigma$	Conductivité en siemens/mètre.
$f$	Fréquence du radar HF en MHz.
$\Delta r$	Résolution en distance du radar HF.
$c$	Vitesse de la lumière.
$b$	Largeur de la bande de fréquence du radar HF.
$A_i$	Couverture journalière des courants par le radar HF en présence de glace de mer.
$A_m$	Couverture journalière des courants estimée en absence de glace de mer.
$\Gamma$	Performance des radars HF définie par le ratio $A_i/A_m$ .
$P_T$	La puissance moyenne émise.
$G_T$	Le gain en puissance de l'antenne de transmission.



$D_R$	Directivité de l'antenne de réception.
$\tau$	Le temps d'intégration cohérente.
$\sigma_t$	La section efficace radar de la surface de l'eau au sein de la cellule radar.
$R$	La distance à la cellule radar.
$kT$	La densité spectrale d'énergie du bruit thermique du récepteur interne.
$F_a$	Le facteur par lequel le bruit externe dépasse le bruit du récepteur interne.
$F$	Le facteur normalisé d'atténuation unidirectionnelle de l'intensité du champ EM.
$S$	Densité spectrale d'énergie de Bragg/ Bragg spectral energy density.
$\omega$	Fréquence angulaire des vagues ( $\text{rad s}^{-1}$ ).
$\omega_m$	Fréquence angulaire modale des vagues ( $\text{rad s}^{-1}$ ).
$H$	Hauteur significative des vagues.
$a$	Coefficient calculé par la fonction «lsqcurvefit» en $\text{km}^2$ .
$S_0$	Coefficient calculé par la fonction «lsqcurvefit» en $\text{m}^2/\text{Hz}$ .
$k$	Coefficient de correction des prédictions de densité spectrale d'énergie de Bragg du modèle GENER.
$S_{ob}$	Densité d'énergie de Bragg calculée à partir des observations de la bouée IML-4.

$S_p$	Densité spectrale d'énergie de Bragg estimée à partir des prédictions du modèle GENER.
$C$	Concentration journalière de glace mer moyennée sur le fetch du vent.







## ***INTRODUCTION GÉNÉRALE***

Dans la plupart des pays disposant de zones côtières, la majorité de la population vit à proximité de la côte, ce qui accroît la nécessité pour des mesures précises, fiables et détaillées des variables de l'environnement côtier. En particulier, les courants de surface de l'océan affectent les loisirs, les opérations de sauvetage en mer, la surveillance de la qualité de l'eau, le suivi des efflorescences algales nuisibles, le transport larvaire et celui du plancton qui représente la base de la chaîne trophique, l'érosion côtière, le transport des matières dangereuses (exemple : suivi des déversements de pétrole), la surveillance côtière, les capacités de frappe militaire et la lutte contre les mines (Bjorkstedt et Roughgarden 1997; Graber et Limouzy-Paris 1997; Paduan et Rosenfeld 1996; Emery *et al.* 2004).

Traditionnellement, les dispositifs utilisés pour obtenir des mesures de courants marins pour les quelques premiers mètres de la colonne d'eau sont des instruments placés directement dans l'eau comme les ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profiler*) ou les bouées dérivantes. Cependant, ces outils ne peuvent pas fournir des observations bi-dimensionnelles et continues de courants de surface (Paduan et Rosenfeld, 1996 ; Chapman *et al.* 1997). Les radars hautes fréquence sont les seuls instruments qui peuvent mesurer les courants sur de vastes zones avec la résolution requise pour les applications décrites ci-dessus. Même les satellites n'ont pas cette capacité (n'ayant pas la résolution temporelle nécessaire, Chapman et Graber 1997; Haus *et al.* 1997).

Un Radar Haute Fréquence (RHF) est un système côtier de télédétection conçu pour cartographier les courants de surface sur une zone étendue avec une portée pouvant aller jusqu'à 200 km et une résolution de l'ordre du kilomètre. Les données peuvent être transmises quasiment en temps réel, condition *sine qua non* pour l'aide aux opérations de sauvetage en mer.

Les radars HF sont utilisés depuis une trentaine d'années pour cartographier les courants dans plusieurs régions à travers le monde. Ces instruments couvrent désormais la majorité des côtes pacifique et atlantique des États-Unis, mais très peu sont déployés le long des côtes canadiennes (Figure 1). La majeure partie des eaux côtières canadiennes a comme particularité d'être partiellement couverte de glace de mer en hiver. Les rares déploiements de radars HF dans des zones partiellement couvertes de glace ont montré que la couverture des radars était fortement influencée par la présence de glace de mer, mais cet effet n'a encore jamais été quantifié, ce qui est l'objectif de cette étude.

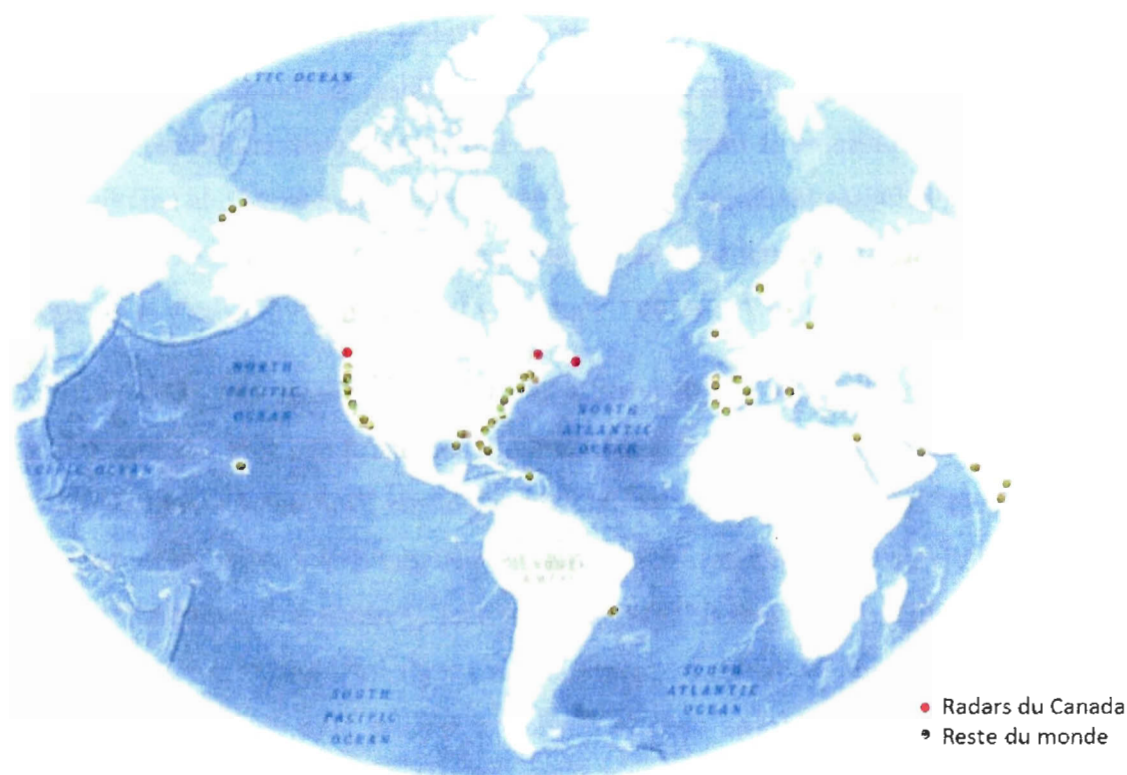


Figure 1 : Carte montrant les positions des radars HF répertoriés par IOOS (Integrated Ocean Observing System) sur les côtes américaines et eurasiennes (modifiée de <http://www.ioos.noaa.gov>)

## 1. Zone d'étude

L'estuaire du Saint-Laurent est l'un des estuaires les plus importants du point de vue de sa largeur et de sa profondeur en Amérique du Nord. Drainant un bassin de 1 320 000 km<sup>2</sup>, son apport d'eau douce représente plus de 1% de l'apport mondial (El-Sabh et Silverberg, 1990). L'estuaire du Saint-Laurent se divise naturellement en deux parties, l'estuaire inférieur (ou maritime) et l'estuaire moyen, séparées par un seuil se situant à la tête du Chenal Laurentien à la hauteur de Tadoussac.

Notre zone d'étude se situe au niveau de la zone centrale de l'estuaire maritime et s'étend des îles du Bic jusqu'à la péninsule Manicouagan. Le choix de cette zone d'étude s'est basé sur des critères de faisabilité du projet, notamment la facilité d'accès à la zone pendant l'hiver ainsi que la disponibilité de mesures *in situ* de vagues et de vent grâce à la présence de la bouée océanographique IML-4, au centre de la zone de couverture des radars (Figure 2).

L'estuaire maritime du Saint-Laurent a une largeur de 20 à 50 km depuis le Saguenay jusqu'à Pointe des Monts. Cette zone est caractérisée par une circulation de type estuarienne avec la présence d'au moins deux couches d'eau présentant des caractéristiques physiques différentes; une couche d'eau salée en profondeur (>150 m) provenant de l'océan Atlantique, de salinité 33-35 psu et de température 3-5 °C, et une couche d'eau moins salée en surface provenant du ruissellement du bassin versant, de salinité 20-31 psu et de température -1,9-14 °C (Ingram et El-sabh 1990). La hauteur et la période des vagues diminuent progressivement de l'embouchure ouverte sur le golfe du St-Laurent jusqu'en amont selon la longueur des fetchs. Les vagues observées habituellement dans l'estuaire sont produites localement par les vents qui soufflent principalement de l'ouest, alors que les vagues de tempêtes sont générées par les vents d'est qui soufflent sur des fetchs beaucoup plus longs. La marée est principalement semi-diurne et son amplitude augmente de l'aval où elle est de 4,2 m à l'embouchure ouverte sur le golf (Drapeau, 1992), vers l'amont,



La zone d'étude est caractérisée par la présence d'une couche de glace variable, non uniforme et peu épaisse (0.1 à 0.7 m, Saucier *et al.* 2003) de Janvier à Mars. L'acquisition des données a été effectuée durant l'hiver 2012-2013, bien que cet hiver représentait le 6<sup>ème</sup> volume de glace le plus bas depuis 1969 (Galbraith *et al.* 2014).

Deux radars de type « *Coastal Ocean Dynamics Applications Radars* » (CODARs) transférés de la Technopole Maritime du Québec à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) en Novembre 2012, ont été déployés sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent avec deux fréquences différentes : 12,5 MHz à Pointe-au-Père (PAP, 48,52°N ; 68,47°O) et 13,5 MHz à Sainte-Flavie (STF, 48,61°N ; 68,23°O). Sur la rive nord, deux radars de type « *Wellen Radar* » (WERA) avec la technologie d'antenne Northern Radar Inc, acquis grâce au financement de Développement Économique du Canada pour les Régions du Québec, ont été déployés à Pointe-aux-Outardes (PAO, 49,04°N ; 68,46°O) et à Pointe-à-Boisvert (PAB, 48,57°N ; 69,13°O) avec une fréquence de 16,15 MHz pour les deux sites (Figure 2).

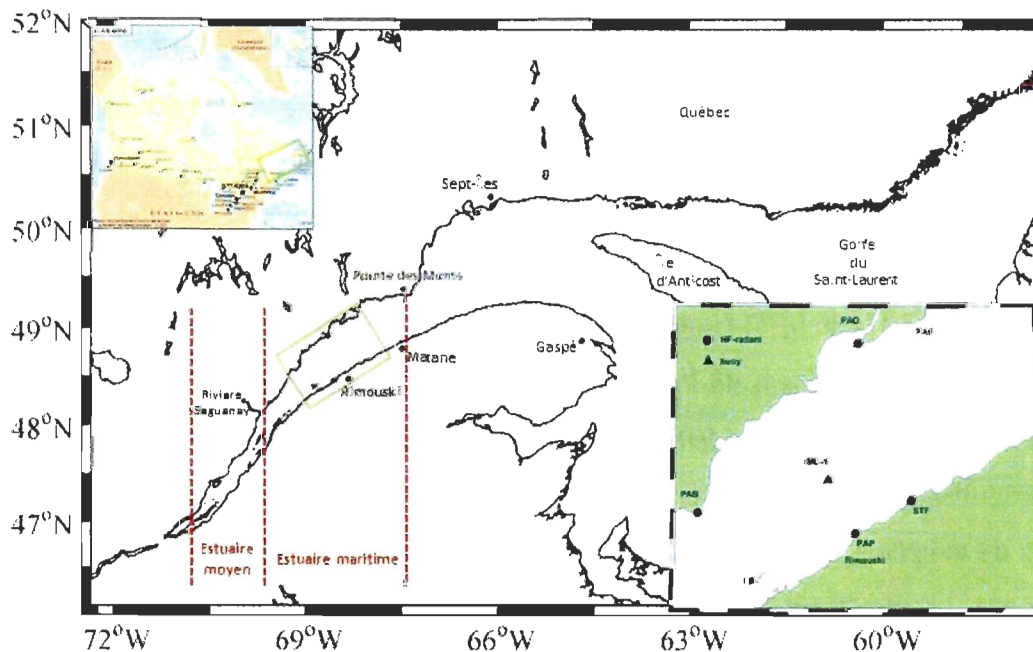


Figure 2 : Carte de la zone d'étude avec l'emplacement des radars HF et de la bouée IML-4 (insert en bas à droite). I.B. : Îles du Bic. P.M. : Péninsule Manicouagan

Avoir quatre radars au lieu de deux permet d'améliorer la qualité des données, tout en offrant une redondance en cas de panne d'un radar. Avoir deux types de radars permet aussi de comparer leurs performances.

Les mesures de courants ont été moyennées sur des périodes de 75 minutes pour les CODARs (données toutes les 60 min, avec 25% de recouvrement) et de 10 minutes pour les WERAs (avec répétition toutes les 20 min) sur une grille polaire avec une résolution radiale de 1,5 km. La résolution angulaire des radars n'est pas clairement définie mais elle peut être déduite approximativement à partir de la largeur des faisceaux qui varie de 10 à 21° pour les WERAs à 12 antennes, et elle est estimée à 5° pour les CODARs. Malheureusement, le radar WERA de PAB n'a pas fonctionné correctement tout au long de la période de l'étude en raison d'un niveau de bruit très élevé, mais présent seulement lorsque le radar émettait des ondes radios. Le niveau de bruit était maximum dans une direction particulière le long de l'axe longitudinal de l'estuaire. La même direction par rapport à l'orientation du réseau d'antennes de réception, mais orientée vers l'autre côté (vers la terre), pointe vers une station électrique située à 350 m des antennes de réception. Cette station, cachée de la vue par des arbres, n'avait pas été remarquée lors de l'installation du radar. L'étude s'est alors basée sur les mesures de trois radars, les deux CODARs de la rive sud à PAP et STF, et le WERA de PAO sur la rive nord. La bande passante pour tous les sites est de 100 kHz.

## **2. RHF : un bref historique**

Le premier système de télédétection Haute Fréquence utilisé pour la mesure des courants de surface était le CODAR qui a été développé en 1977 par le Laboratoire de Propagation des Ondes (WPL, *Wave Propagation Laboratory*), appelé maintenant Laboratoire des Technologies Environnementales, de la «*National Oceanic and Atmospheric Administration*» (NOAA) (Barrick *et al.* 1977; Barrick *et al.* 1985). Les radars se sont beaucoup développés par la suite en se basant sur les CODARs, en changeant de

configuration spatiale des antennes au Royaume Uni par la compagnie Marconi qui développait les OSCR (*Ocean Surface Current Radar*, Prandle *et al.* 1993) et en Allemagne (Gurgel *et al.* 1986), puis aux Etats-Unis avec la création d'une deuxième génération de CODARs appelée *SeaSonde* (Paduan et Rosenfeld 1996; Barrick et Lipa 1997; Paduan et Cook 1997). Les CODARs ainsi que les OSCRs ont été utilisés à bord de navires par Gurgel et Essen (2000) et Peters et Skop (1997), respectivement. Indépendamment des CODARs, le développement des radars HF s'est aussi effectué au *Centre for Cold Ocean Resources Engineering* (C-Core) au Canada (Khan et Mitchell 1991 ; Hickey *et al.* 1995), au Royaume Uni à l'université de Birmingham (Shearman et Moorhead 1988), à l'université de Toulon en France (Broche *et al.* 1987) et en Australie (Heron 1987). Environ une dizaine d'années après, l'université de Hambourg a développé un nouveau radar HF appelé *Wellen Radar* (WERA) utilisant des techniques différentes de celles des CODARs (Barrick 1978; Gurgel *et al.*, 1999a; Paduan et Washburn 2013).

### 3. Le principe de fonctionnement

Les radars HF mesurent les courants à la surface de l'océan en émettant des ondes électromagnétiques dans la bande des hautes fréquences radio (3-30 Mhz) qui se propagent de manière tangentielle et couplée à la surface de l'océan. Les antennes de réception des radars reçoivent les ondes rétrodiffusées par les ondes de gravité de surface (ou vagues) de l'océan. Les échos provenant de vagues ayant une longueur d'onde égale à la moitié de celle de l'onde incidente interfèrent constructivement (diffusion de Bragg), alors que les autres échos interfèrent destructivement au niveau de la position du récepteur (Crombie 1955, Figure 3).

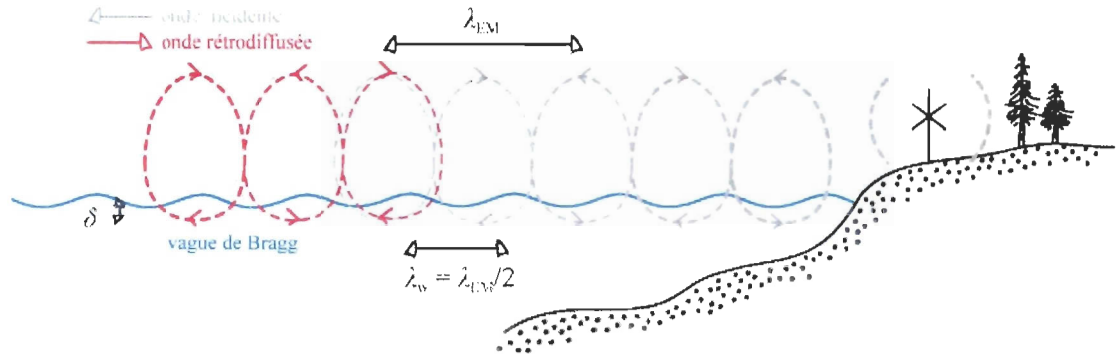


Figure 3 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement des radars HF.  $\lambda_{EM}$ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique émise par le radar.  $\lambda_w$ : longueur d'onde des vagues de Bragg.  $\delta$ : la profondeur sur laquelle s'étend l'onde électromagnétique (Équation 1)

L'amplitude de l'onde EM de surface décroît exponentiellement dans l'eau sur une profondeur qui dépend de la conductivité de l'eau et de la fréquence radio et s'exprime comme suit (Barrick et Long 2006):

$$\delta \equiv \frac{\lambda_{EM}}{2\pi \times \text{Im} \left( \sqrt{\varepsilon_r + \frac{i\sigma \times 18000}{f}} \right)} \quad (1)$$

où  $\varepsilon_r$  est la constante diélectrique relative de l'eau, égale à 81 au-dessous de 500 MHz,  $\sigma$  est la conductivité en siemens/ mètre,  $f$  est la fréquence du radar en MHz, et Im signifie la partie imaginaire.

Le radar HF reçoit un signal de retour dominé par les ondes radio rétrodiffusées par les vagues dites de Bragg ou de premier ordre. Tout mouvement relatif dans la direction joignant le récepteur et la cible de la diffusion (les vagues) produit un décalage Doppler de la fréquence des ondes reçues (Figure 4). Pour les radars côtiers, le récepteur est immobile

alors que les vagues se déplacent à une vitesse connue, produisant ainsi un décalage Doppler connu. En présence de courants de surface, un décalage Doppler additionnel est mesuré, donnant ainsi une mesure de courant de surface dans la direction reliant l'instrument et la cible (courant radial). Par conséquent, il faut au moins deux radars séparés par une certaine distance afin de déduire l'amplitude et la direction des courants de surface (Barrick *et al.* 1977; Lipa et Barrick 1986).

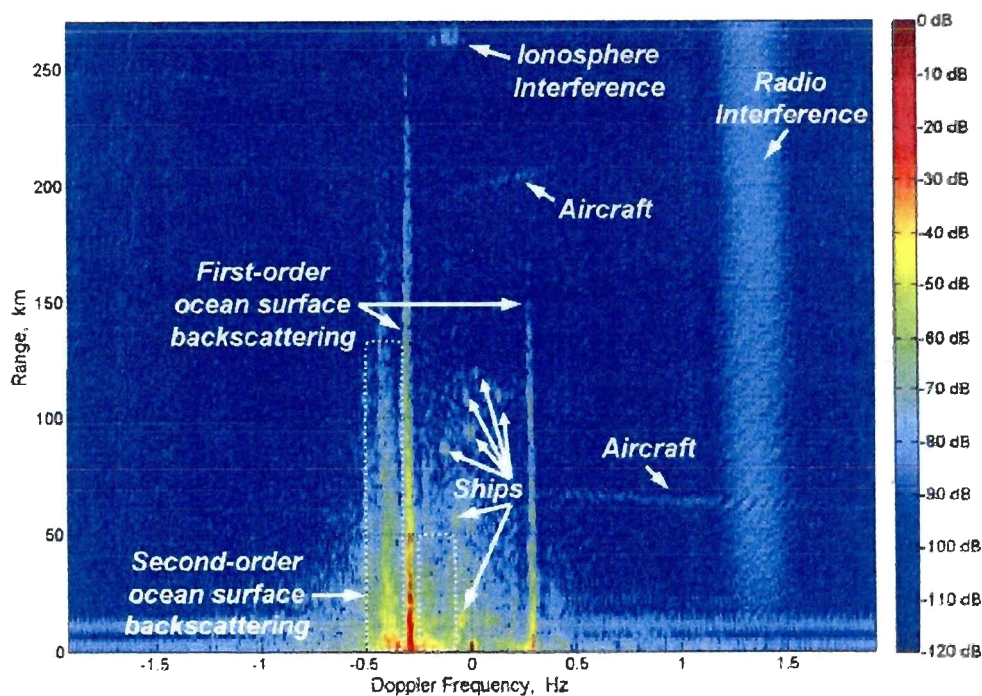


Figure 4 : Exemple d'une carte Distance- Fréquence Doppler produite par un radar HF (Dzvonkovskaya et al. 2009)

La portée de ces instruments de mesure des courants de surface dépend essentiellement de l'atténuation de l'onde électromagnétique entre l'émetteur et la cible, de l'intensité de la diffusion de la cible, de la puissance de la source et du bruit électromagnétique ambiant. L'atténuation des ondes radio croît avec l'augmentation de la

fréquence utilisée et la diminution de la conductivité de l'eau (salinité) ; moins l'eau est salée, plus les ondes radio sont atténuées (Gurgel *et al.* 1999a; Barrik et Long 2006).

#### 4. Le traitement du signal

Les radars HF mesurent la composante radiale des courants sur une grille polaire (distance, azimut). Les techniques pour déterminer la distance et l'azimut des mesures sont brièvement expliquées ci-dessous.

##### *Résolution radiale*

Pour déterminer la distance, les WERAs transmettent des pépiements (chirps) d'ondes continues à fréquence modulée FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) où le décalage entre la fréquence du signal transmis et celle des échos reçus détermine la distance de la cible. Les CODARs utilisent aussi des chirps, mais ils sont interrompus (FMiCW). Alors que les WERAs transmettent sans interruption, ce qui nécessite de découpler les antennes de transmission des antennes de réception, les CODARs ne transmettent que 50% du temps et ne reçoivent jamais les échos pendant la transmission, ce qui permet de placer les antennes de transmission et de réception proches l'une de l'autre. La technique FMCW/ FMiCW permet de modifier simplement la résolution en distance en modifiant la largeur du chirp (Gurgel *et al.* 1999a; Gurgel *et al.* 1999b; Essen *et al.* 2000; Heron et Atwater 2013). La résolution en distance  $\Delta r$  dépend de la largeur de la bande de fréquence utilisée comme suit :

$$\Delta r = c/2b \quad (2)$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière et  $b$  la largeur de la bande de fréquence.

### **Résolution angulaire**

La différence principale entre les CODARs et les WERAs tient à la technique utilisée pour déterminer l'azimut des signaux reçus et à la configuration des antennes de réception permise par cette technique.

CODAR a opté pour une unique antenne de réception (Figure 5, panneau de gauche), constituée de trois éléments : deux boucles verticales entrecroisées et orientées à  $90^\circ$  l'une de l'autre, et un monopole vertical au centre. La technique pour déterminer l'azimut des signaux est appelée *direction finding* et l'algorithme utilisé est appelé MUSIC (*Multiple Signal Classification*, Schmidt 1986; Barrick et Lipa 1997). Pour chaque décalage en fréquence autour du décalage de Bragg, qui correspond à une valeur particulière de courant radial, un ou plusieurs azimuts sont déterminés par l'algorithme. Avec la configuration d'antenne de réception choisie pour les CODARs, au maximum deux azimuts peuvent être déterminés. Une fois tous les décalages en fréquence analysés, les courants radiaux sont triés par azimuts et moyennés dans des bandes azimutales de 5 degrés.

WERA est plus flexible quant à la configuration des antennes de réception. La configuration la plus compacte consiste en 4 antennes (monopoles verticaux) disposées en carré dont la diagonale mesure la moitié de la longueur d'onde transmise,  $\lambda/2$ . Avec cette configuration, la technique pour déterminer l'azimut des signaux est le *direction finding*, mais l'algorithme diffère de celui utilisé par les CODARs, car il se base sur les différences de phase entre chaque paire d'antennes. L'autre configuration consiste en un réseau de plusieurs antennes (généralement entre 8 et 16), disposées linéairement ou non (Figure 5, panneau de droite), chaque antenne ne devant pas être à plus de  $\lambda/2$  des antennes adjacentes. La technique pour déterminer la direction des signaux est la formation de faisceau (*beam-forming*), où des déphasages sont ajoutés aux enregistrements de chaque antenne en post-traitement afin que seuls les signaux provenant d'une direction particulière s'additionnent constructivement entre toutes les antennes. La résolution angulaire du *beamforming* est liée à la largeur du faisceau synthétique créé en post-traitement, qui



dépend du nombre d'antennes utilisées et de l'azimut. Pour 16 antennes séparées de  $\lambda/2$  et en réseau linéaire, la largeur du faisceau varie de 7,5 degrés dans la direction perpendiculaire à celle du réseau d'antennes, à 15 degrés lorsqu'on s'écarte de cette direction de 60 degrés (Paduan et Graber 1997; Teague *et al.* 1997; Gurgel *et al.* 1999a; Essen *et al.* 2000; Paduan et Washburn 2013). Pour un réseau linéaire de 12 antennes, tel qu'utilisé à PAO, la largeur du faisceau varie de 10 à 21 séparées de  $\lambda/2$ .



Figure 5 : Photos des deux types d'antennes de réception (à gauche un CODAR et à droite un WERA, photos prises par Cédric Chavanne)

L'avantage de la configuration des CODARs réside principalement dans le fait que l'antenne de réception est compacte et donc facile à installer même dans des sites où l'espace est restreint. Les désavantages sont que les cartes de courants ont souvent des zones où aucun courant n'est "retrouvé" (trous), et les données sont assez bruitées. Le beam-forming des WERAs, en revanche, produit des cartes de courants plus complètes et moins bruitées, mais nécessite un espace d'installation beaucoup plus grand.



## 5. Travaux antérieurs

Très peu de radars HF ont été déployés dans les régions polaires. Lipa *et al.* (1986) ont mesuré des courants océaniques et des vitesses de dérive de glace de mer dans la Baie de Prudhoe en Alaska, avec un radar HF de type CODAR à 25-Mhz. Aucune mesure indépendante de dérive de glace ou de courant n'a été récoltée pour valider les mesures des radars HF, même si ces dernières étaient fortement corrélées avec les mesures de vent les plus proches, en appui aux résultats obtenus. Flocco *et al.* (2003) ont démontré la faisabilité de mesurer les courants de surface au sein de la polynie de la baie de Terra Nova, dans la mer de Ross, avec des radars HF installés sur terre. Potter et Weingartner (2010) ont investigué les performances des radars HF CODAR installés à terre à 25 et 13 Mhz pour des eaux partiellement couvertes de glace dans la mer de Beaufort. Ils ont découvert que généralement les courants océaniques ne peuvent pas être mesurés dans une cellule de la grille contenant de la glace, à l'exception d'une glace très mince ou de petits morceaux de banquise isolés. Lorsqu'une bande de morceaux de banquise fragmentée est présente entre 20 et 30 km au large avec des eaux libres de glace près de la côte et plus au large de la bande, les ondes radio sont capables de se propager sur la bande de glace et les courants peuvent être mesurés au large de la bande. Toutefois, en fonction de la vitesse et de la direction du vent relative à la côte et à la bande de glace, les eaux libres de glace entre la côte et la bande peuvent représenter un fetch limité pour le développement des vagues de Bragg, empêchant ainsi les mesures de courants dans cette zone. Ces derniers résultats importants ne sont pas encore publiés dans la littérature revue par les pairs, et les auteurs ont noté qu'ils étaient incapables de déterminer d'une manière complète l'espace des paramètres qui permet aux radars HF d'échantillonner au sein des aires partiellement couvertes de glace. C'est précisément l'objectif de cette maîtrise d'explorer cet espace des paramètres de manière plus exhaustive.

## 6. Problématique, objectifs et hypothèses de l'étude

### *Problématique*

Cette étude s'intéresse à l'utilisation des radars HF dans un milieu partiellement couvert de glace. Il a été noté que la couverture des courants par les radars HF se réduit énormément en présence partielle de glace de mer (Figure 6). La présence de glace de mer agit d'une manière directe sur la salinité à la surface de l'océan et par conséquent sur la conductivité, ce qui peut augmenter l'atténuation des ondes électromagnétiques de surface (Gurgel *et al.* 1999b). De plus, la présence de glace de mer limite le fetch du vent pour les eaux ouvertes adjacentes, ce qui limite le développement des vagues de Bragg pour une vitesse et une durée de vent donnée (WMO 1998). D'autre part, la rétrodiffusion du signal transmis par les radars HF se fait essentiellement par les vagues de courtes périodes qui sont rapidement atténuées par la glace de mer (Squire 2007 ; Dumont *et al.*, 2011).

La zone de couverture des radars HF dépend aussi d'autres facteurs, notamment la fréquence transmise par le radar HF car les ondes radio de basses fréquences sont moins atténuées et se propagent ainsi plus loin que les ondes de hautes fréquences. De plus, les vagues courtes (hautes fréquences) sont plus rapidement amorties par la glace de mer, mais moins affectées par la réduction du fetch du vent (exigeant un fetch de vent plus court) que les vagues longues (basses fréquences). Les conditions environnementales agissent aussi d'une manière directe sur la couverture des radars HF, telles que le vent, les vagues, la salinité de surface de la mer, la présence de glace de mer, et le bruit EM ambiant (Crombie 1955; Potter et Weingartner 2010; Gurgel *et al.* 1999a).

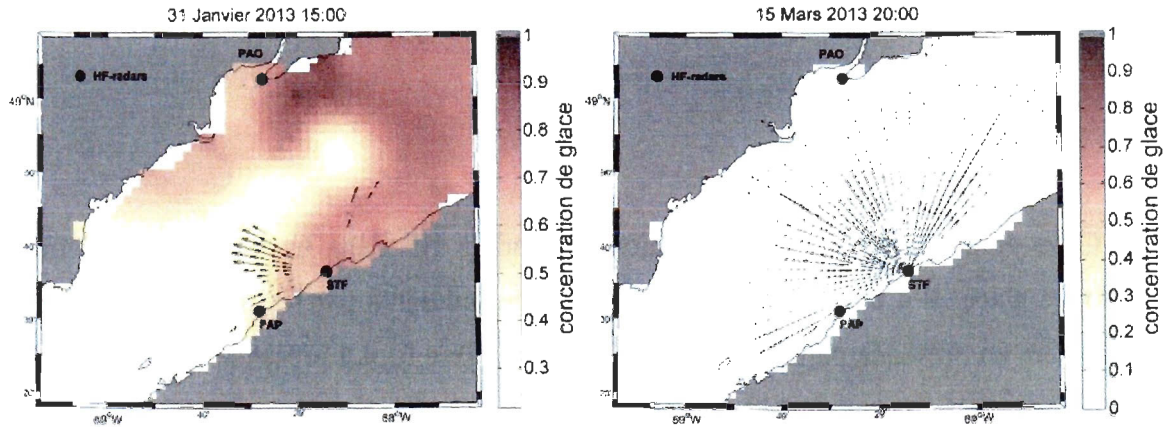


Figure 6 : Cartes de courants mesurés par le CODAR de STF en présence de glace de mer (à gauche) le 31 Janvier 2013 à 15:00 UTC et en absence de glace de mer (à droite) le 15 Mars 2013 à 20:00 UTC. La concentration de glace de mer provient du système canadien opérationnel de prévision glace-océan

### Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de caractériser la performance des radars haute fréquence pour la mesure des courants à la surface de la mer en présence de glace de mer en fonction des paramètres suivants :

- le type de radar HF (*beamforming* vs. *direction finding*)
- la concentration de la glace de mer,
- la densité d'énergie des vagues de Bragg (qui dépend de la vitesse, la durée et le fetch du vent ainsi que de la radiofréquence utilisée).

La notion de performance des radars HF sur laquelle se base notre étude se définit par le ratio entre la couverture journalière des courants mesurés par un radar HF en présence de glace de mer, que l'on nommera  $A_i$ , et la couverture journalière estimée en absence de glace de mer dans les mêmes conditions de vent, nommée  $A_m$ . La performance est alors définie comme  $\Gamma = A_i/A_m$ .

Le choix de se baser sur des couvertures journalières plutôt qu'horaires permet de réduire l'effet du bruit électromagnétique ambiant, qui a notamment un cycle diurne marqué.

### ***Hypothèses***

1. La performance d'un radar HF diminue en présence de glace de mer dans le domaine d'observation.
2. La performance diminue en présence de glace de mer en dehors du domaine d'observation lorsque celle-ci limite suffisamment le fetch du vent.
3. Plus la concentration de glace de mer est importante, plus la performance des radars est réduite.

Ce mémoire est structuré comme suit : un chapitre qui fait l'objet d'un article à soumettre dans une revue scientifique, rédigé en anglais, et qui présente la méthodologie de l'étude et les résultats suivis d'une discussion. La conclusion générale, rédigée en français, qui résume toute la démarche suivie pendant l'étude et les résultats obtenus, et décrit les limites ainsi que les perspectives.



# **CHAPITRE 1**

## **EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF HIGH FREQUENCY CODAR AND WERA RADARS TO MEASURE OCEAN CURRENTS IN PARTIALLY ICE-COVERED WATERS**

### **1.1. INTRODUCTION**

For more than 30 years, High Frequency Radars (HFRs) have been used to map ocean surface currents over wide areas for several practical applications including support for commercial navigation, coastal surveillance, tracking oil spills and other toxic materials, coastal erosion, search and rescue operations and biological research through aiding studying larval dispersal and predicting the population dynamics of commercially exploited species (Bjorkstedt and Roughgarden 1997; Graber and Limouzy-Paris 1997).

High Frequency (HF) remote sensing is based on the scattering of electromagnetic (EM) waves from the rough sea surface, which can be described by the theory of wave-wave interaction (Bragg scattering, Crombie 1955). HFRs transmit EM waves in the HF band (3-30 MHz), which propagate along the sea surface, and measure the Doppler shift of the back-scattered EM waves caused by ocean surface waves and currents. First-order backscattering resonance occurs when the wavelength of the surface waves is one half of the transmitted EM wavelength (Bragg-waves). Two or more shore-based HF-radars allow mapping every hour ocean surface currents over large coastal areas with horizontal resolution on the order of 1-km.

HFR range depends essentially on the signal-to-noise ratio (SNR) of the back-scattered EM waves and it is given by (e.g. Wehlan *et al.*, 2011):

$$SNR = P_T \frac{G_T D_R F^4 \lambda^2 \sigma_t \tau}{(4\pi)^3 R^4 k T F_a} \quad (3)$$

where  $P_T$  is the average radiated power,  $G_T$  the transmit antenna power gain,  $D_R$  the receive antenna directivity,  $\lambda$  the radar wavelength,  $\tau$  the coherent integration time,  $\sigma_t$  the radar cross section of water surface within radar cell,  $R$  the range to radar cell,  $kT$  the internal receiver thermal noise spectral density ( $4 \times 10^{-21}$  W/Hz),  $F_a$  the factor by which external noise exceeds internal receiver noise, and  $F$  the normalized one-way field strength attenuation factor that depends on frequency, surface material dielectric constant, distance, surface roughness (sea state) and includes diffraction over spherical earth.

So, the coverage area of the radars is dependent on frequency (lower frequencies allow greater ranges to be achieved but at the cost of lower spatial resolution) and environmental conditions such as winds, waves, sea surface salinity, presence of sea ice, and ambient radio noise level and interferences (Crombie 1955, Gurgel *et al.* 1999a, Barrick and Long 2006, Potter and Weingartner 2010).

This study focuses on the use of HFRs to map surface currents in partially ice-covered waters using two different types of HFRs: CODAR and WERA. Mapping surface currents in partially sea-ice covered waters using HFRs has already been done in the past. A 25-MHz CODAR was deployed in Prudhoe Bay, Alaska, during ice breakup in July 1984 to investigate the possibility of using HFRs to observe ice and water velocities as well as monitoring the ice cover (Lipa *et al.* 1986). No independent measurement of ice drift or current was collected to validate the HFRs measurements, but they were highly correlated with nearby measurements of wind, encouraging their potential for measuring surface currents or ice drift in winter. Flocco *et al.* (2003) demonstrated the feasibility of measuring surface currents in the polynya of Terra Nova Bay in the Ross Sea, with shore-based HF radars at 27 MHz. Potter and Weingartner (2010) investigated the performance of shore-based CODARs at 25 and 13 MHz for partially ice-covered waters in the Beaufort Sea. They found that generally ocean currents can't be measured in a grid cell containing ice,

except for very thin ice or small and isolated ice floes. When a band of ice floes was present between 20 and 30 km offshore with open water near the coast and offshore of the band, radio waves were able to propagate above the band of ice and currents could be measured offshore of the band. However, depending on the speed and direction of the wind, ice-free waters between the coast and the band could represent a limited fetch for the development of Bragg waves, thus preventing measurements of currents in this area. These important results have not yet been published in the refereed literature, and the authors noted that they were unable to investigate the complete parameter space that allows HF radars to measure ocean currents within partially ice-covered waters.

The aim of this work is to assess experimentally the performance of two types of coastal HF radars to map surface currents in partially ice-covered waters using different frequencies as a function of ice concentration and wind speed, duration and fetch.

The performance of HFR is defined here as the ratio between daily coverage measured by HFR in the presence of sea ice, which will be called  $A_i$ , and the estimated daily coverage in the absence of sea ice in the same wind conditions, called  $A_m$ . Performance is then defined as  $\Gamma = A_i/A_m$ . Using daily rather than hourly coverage allows to reduce the effect of ambient electromagnetic noise, which has a characteristic daily cycle. Since measurement maximum range is proportional to SNR, performance can be expressed as:

$$\Gamma = \frac{A_i}{A_m} \sim \left( \frac{SNR_i}{SNR_m} \right)^2 \sim \left( \frac{F_i^4 \sigma_{ti}}{F_m^4 \sigma_{tm}} \right)^2 \quad (4)$$

Performance therefore depends only on the radar cross section of water surface within radar cell  $\sigma_t$  and the normalized one-way field strength attenuation factor,  $F$ , which depend on salinity, sea ice and sea state.

Barrick and Long (2006) showed that EM waves are affected by sea surface salinity only over a depth given by equation 1. A numerical calculation for our HFRs gives a depth



of 8-9 cm. Since we have no salinity measurements as close to the surface and the LSLE is strongly stratified in salinity, especially near the surface, we cannot quantify the effect of salinity on the radar coverages.

This paper is organized as follows: the study area and radar system details are described in section 2. Section 3 provides oceanographic and meteorological data sources followed by data processing steps applied on HFR coverage and ice data. Results are presented in section 4. The final section summarizes the results and provides a discussion and the conclusions of the study.

## **1.2. STUDY AREA AND RADAR SYSTEMS**

### **1.2.1. The area**

The study area is located in the Lower St. Lawrence Estuary (LSLE), Canada, characterized by a non-uniform and variable thin ice cover (typically 0.1 to 0.7m thick, Saucier *et al.* 2003) from January to March. Data acquisition was made during the 2012-2013 winter, despite the fact this winter represented the 6<sup>th</sup> lowest ice volume since 1969 (Galbraith 2014).

The LSLE has a width ranging from 20 to 50 km from the Saguenay to Pointe des Monts. It is characterized by an estuarine circulation type with the presence of at least two water layers having different physical characteristics: a deep (>150m) salty layer coming from the Atlantic Ocean with salinity 33-35 psu and temperature 3-5°C, and a surface layer less salty coming from the watershed runoff with salinity 20-31 psu and temperature -1.9-14°C (Ingram and El-Sabh 1990). The height and wave period gradually decrease from the mouth open to the Gulf of St. Lawrence to upstream due to the decreasing fetch lengths. Waves generally observed in the estuary are produced locally by winds blowing predominantly from the West, while storm waves are generated by easterly winds that blow over much longer fetches. The tide is predominantly semi-diurnal and its amplitude

increases from downstream, where it is about 4.2 m at the mouth open to the St. Lawrence Gulf (Drapeau, 1992) to upstream.

The LSLE is a well-suited natural laboratory to conduct the project, since it is usually partially ice-covered from December to March while easily accessible for HFR installation and maintenance. Furthermore, most environmental parameters affecting HFR performance are observed or forecasted at high spatial and temporal resolutions. In addition, there is a surface oceanographic buoy moored in the radars field-of-view (IML-4 buoy operated by the Maurice Lamontagne Institute, Figure 7) during ice-free conditions (May-October) that measures waves, winds and sea surface (1m depth) temperature and salinity.

### **1.2.2. HFRs**

Two Coastal Ocean Dynamics Applications Radars (CODARs) have been deployed in November 2012 on the south shore of the Lower St. Lawrence Estuary with two different frequencies: 12.5 MHz at Pointe-au-Père (PAP, 48.52°N, 68.47°W) and 13.5 MHz at Sainte-Flavie (STF, 48.61°N, 68.23°W). On the north shore, one Wellen Radar (WERA) with Northern Radar Inc. antennas has been deployed at Pointe-aux-Outardes (PAO, 49.04°N, 68.46°W) with 16.15 MHz frequency (Figure 7). Measurements were averaged over 75-minute periods for CODARs (data every 60 minutes, with 25% overlapping) and for 10 min for WERA (with repetition every 20 min) on a polar grid with a radial resolution of 1.5 km.

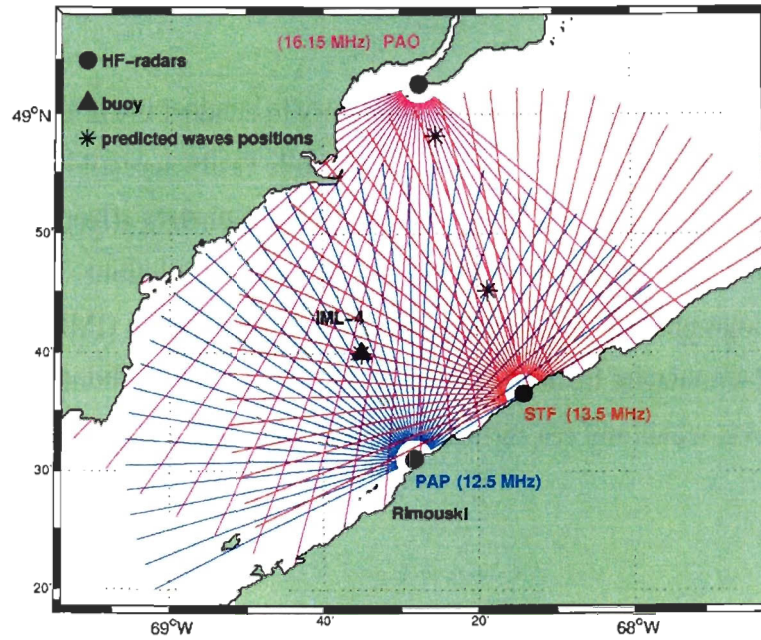


Figure 7 : Map showing the study area and HFR locations with their corresponding polar grids and predicted waves positions

Bandwidth for all sites is 100 kHz. The azimuthal and radial resolutions and the Bragg frequencies for both HFR types are given in Table1.

Table 1 : HFR characteristics

	CODARs		WERA
	PAP	STF	PAO
Azimuthal step (°)	5	5	1
Radial resolution (km)	1.5	1.5	1.5
Radio frequencies (MHz)	12.5	13.5	16.15
Bragg frequencies (Hz)	0.36	0.37	0.41
Bragg wavelengths (m)	12	11.1	9.3

### 1.3. DATA AND METHODOLOGY

#### 1.3.1. Oceanographic and meteorological data

Oceanographic and meteorological data used in this study come from numerical models and an automatic surface met-ocean buoy moored in the estuary. Hourly ice concentrations were obtained from the Canadian operational ice-ocean forecasting system (Smith *et al.* 2012) through the St. Lawrence Global Observatory (OGSL) web portal, while winds come from the Canadian GEM (Global Environmental Multiscale) weather forecasting system (Côté *et al.*, 1998).

The GENER model was forced by GEM winds to estimate significant wave heights and peak periods in the LSLE. GENER is a parametric wave model that was developed to predict waves at one deep water location using 2D wind field and the computed effective fetches for 16 directional sectors around the point of interest (the main assumptions are that the 2D wind maps as inputs represent the global wind conditions over the wave generation domain and the absence of swell (Desjardins and Ouellet 1984; Ruest *et al.* 2013).

The Maurice Lamontagne Institute buoy IML-4 (see Figure 7) measured waves and winds during summer from May to October 2013.

#### 1.3.2. Data processing

Radial currents were processed using standard CODAR and WERA algorithms. Measured antenna patterns were used for CODARs. Currents over land and radial currents greater than 1 m/s were discarded.

It was noted that CODARs have sometimes current measurements in areas with large predicted ice concentrations (Figure 8). Without observations of sea ice conditions, we cannot determine whether this is due to azimuth retrieval errors from the MUSIC algorithm or to sea ice forecast errors.

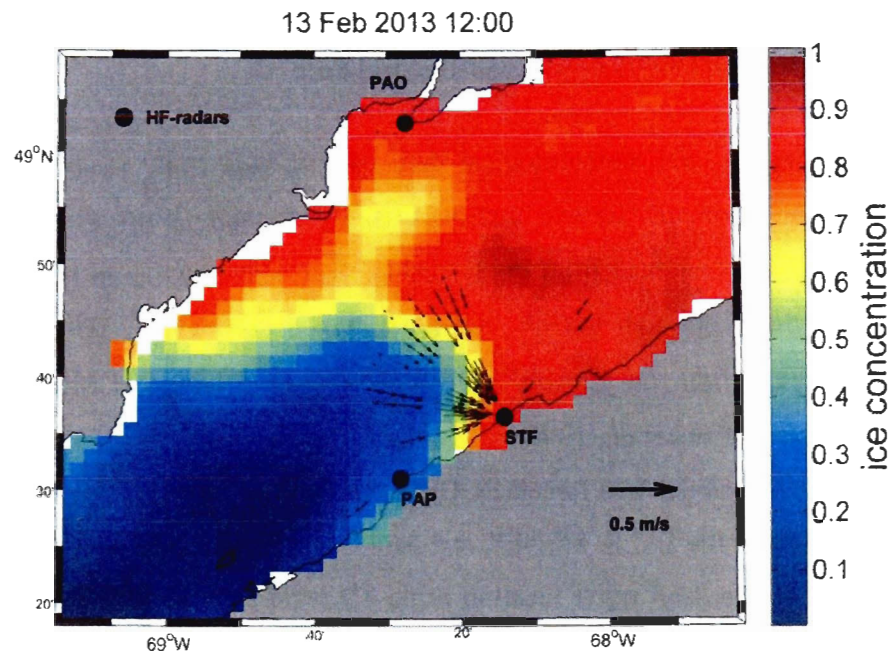


Figure 8 : Current map of the STF CODAR for 13 February 2013 at 12:00 UTC showing some measurements where the forecasting system predicts high ice concentration

For each day, a spatial coverage index is built as follows. It is first initialized to zero at each grid point. Then, for each hourly current map, it is incremented by one unit only for grid points with a valid current measurement. Finally, it is divided by 24, the maximum number of possible measurements. Daily coverage is defined as the area where the spatial coverage index exceeds 0.5 (Figure 9).

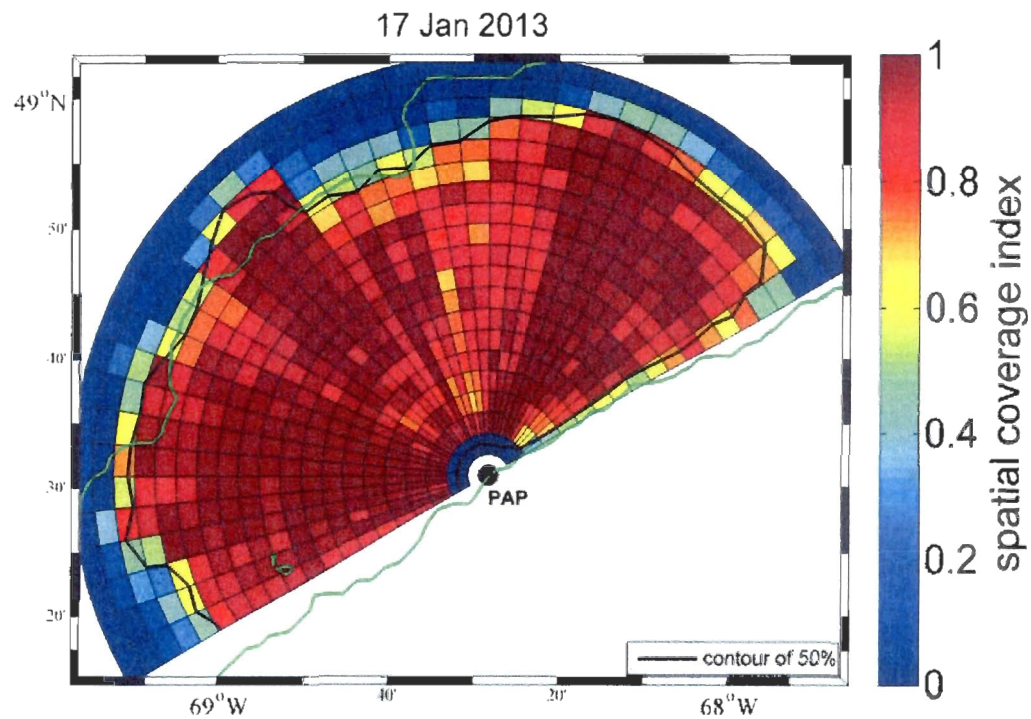


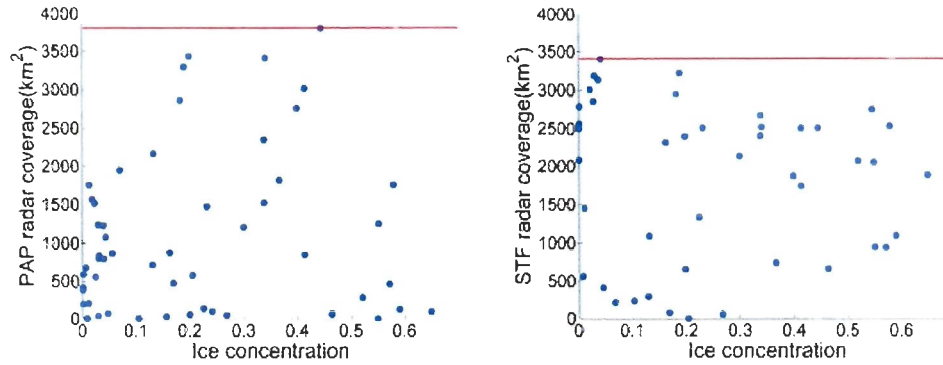
Figure 9 : Example map of PAP daily coverage index with contour of 50% (black line)

## 1.4. RESULTS

### 1.4.1. HFR coverage compared to ice concentration

Hourly ice concentration forecasts were daily and spatially averaged over the domain showed in Figure 7 (between 48.3 and 49.15°N, and 67.7 and 69.25°W). Figure 10 shows daily coverage of the HFRs versus daily sea ice concentration.

## CODARs



## WERA

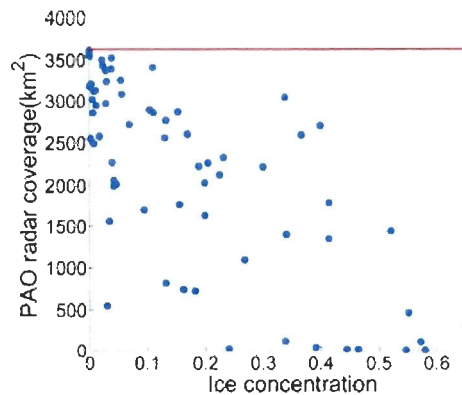


Figure 10 : HFR coverage versus local ice concentration for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). The HFR maximum coverage is shown by the red line

There is no clear relationship between radar coverage and sea ice concentration for any of the radars, although there is a tendency for radar coverage to decrease with increasing sea ice concentration for the WERA at PAO. Clearly, other environmental parameters such as wind must be taken into account.

### 1.4.2. Effect of wind and waves on HFR performance

#### *Bragg energy density from measured wave spectra*

The Bragg energy density is the wave energy density at the Bragg frequency of the HFR. It has, in principle, a direct effect on HFR measurements by affecting the power of the backscatter radar signal (affecting the radar cross section  $\sigma$ , in Equation 3).

Raw data of vertical accelerations recorded at the IML-4 buoy at 4 Hz every 10 minutes, has been used to calculate wave spectra (it is assumed that the accelerations of the buoy are only associated with the movement of the waves). The wave spectra were daily averaged over the period from May to October 2013, and linearly interpolated at the HFRs Bragg frequencies (Table 1) to obtain Bragg energy densities. Figure 11 shows HFRs daily coverage versus daily Bragg energy densities.

There is a clear relationship between radar coverage and Bragg wave energy density for CODARs. Therefore, it is necessary to take this relationship into account before investigating the effect of sea ice.



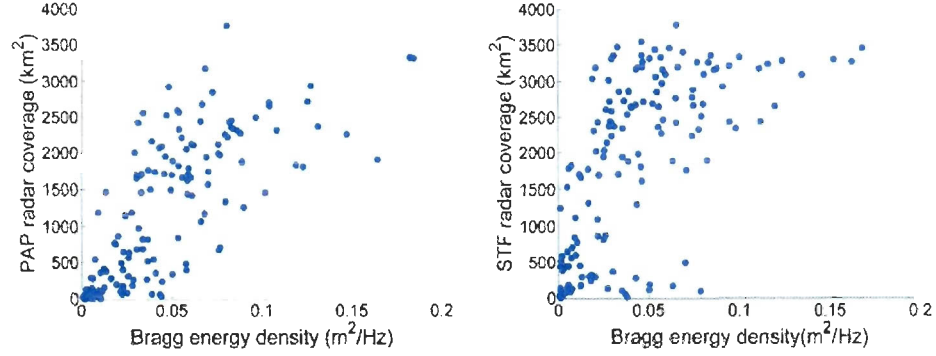
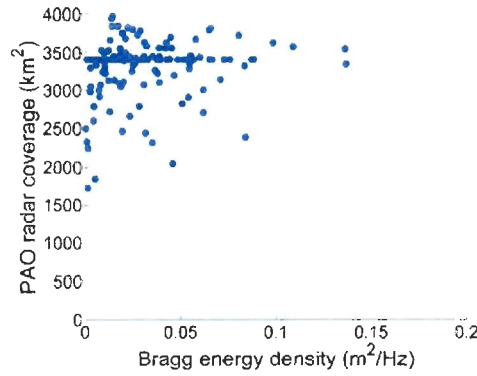
**CODARs****WERA**

Figure 11 : HFR coverage versus Bragg energy density for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel)

### *Two-parameter wave Bretschneider's spectrum*

Since wave observations are not available in winter, we investigated whether a theoretical wave spectrum could be used to predict Bragg energy density simply from significant wave height and peak period data, which can be predicted by GENER.

Waves in the LSLE can often be fetch-limited. For example, the waves cannot be fully developed for daily winds exceeding 8.23 m/s, the wind speed for which waves are limited by the longest fetch of about 300 km (WMO 1998). The Bretschneider spectrum (Bretschneider 1959) is therefore a reasonable choice considering this aspect. This spectrum requires two parameters: the modal frequency (the frequency with maximum

energy), and the significant wave height. These two parameters were computed from the wave spectra measured at the IML-4 buoy during summer 2013. The two-parameter wave Bretschneider's spectrum is defined by the following relation (Ochi 1998):

$$S(\omega) = \frac{4}{1,25} \left( \frac{\omega_m^4}{\omega^5} \right) H^2 e^{-1,25(\omega_m/\omega)^4} \quad (5)$$

where  $H$  is significant wave height (m),  $\omega$  is angular wave frequency ( $\text{rad s}^{-1}$ ), and  $\omega_m$  is the modal angular frequency ( $\text{rad s}^{-1}$ ).

Daily-averaged measured spectra were normalized by the maximum energy density for periods shorter than 6 seconds (to avoid swells), and frequencies were normalized by the corresponding peak frequency. These normalized spectra were averaged during the whole observational period (May to October 2013). The resulting average measured spectrum is very similar to the normalized Bretschneider's spectrum (Figure 12).

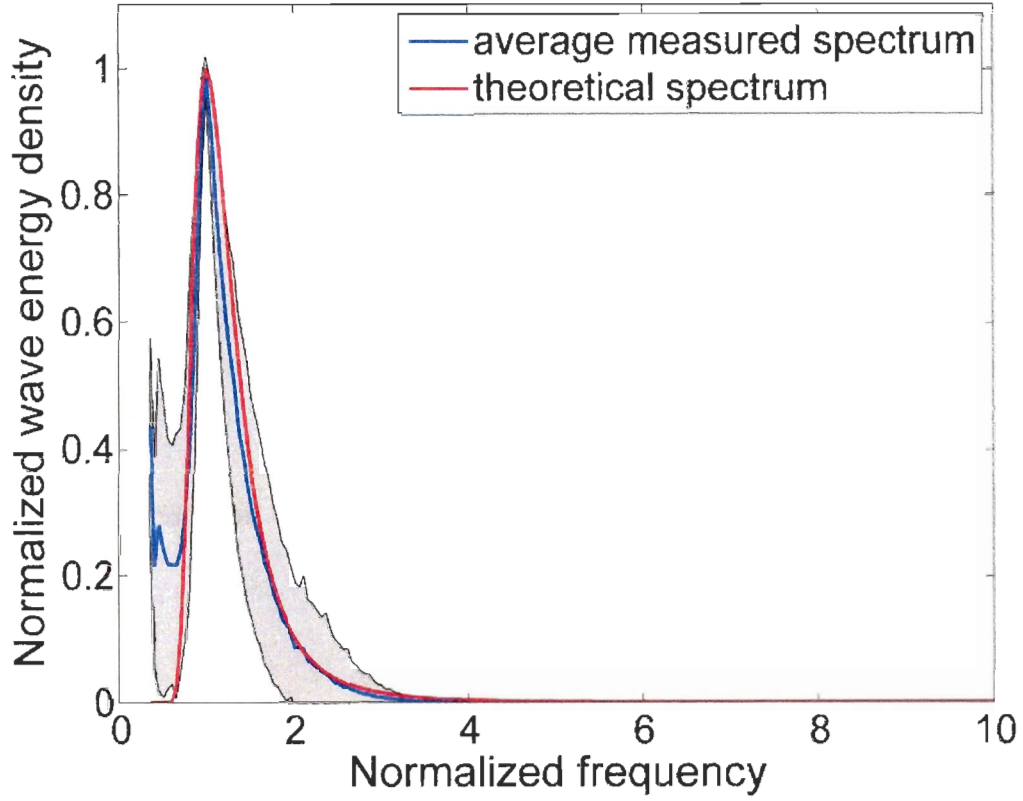
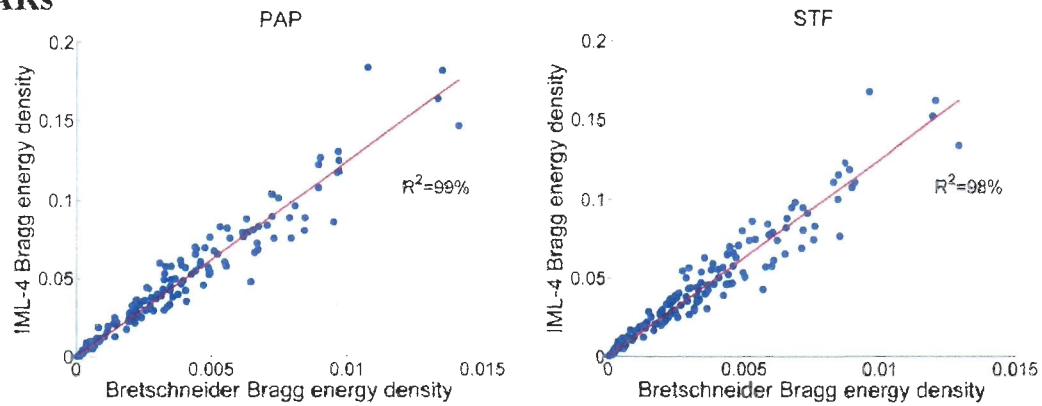


Figure 12 : Comparison between the average measured spectrum in blue and the theoretical spectrum of Bretschneider in red. The standard deviation of the measured spectrum is shown in light gray

To check whether the Bretschneider's spectrum could be used in winter to estimate Bragg energy densities, we computed  $H$  and  $\omega_m$  from daily averaged measured spectra in summer and used Equation 5 to estimate Bragg energy densities. Figure 13 shows observed Bragg energy densities from measured spectra of the IML-4 buoy versus estimated Bragg energy densities. The high correlation coefficients obtained confirm that the Bretschneider spectrum can be used to estimate Bragg energy densities.

## CODARs



## WERA

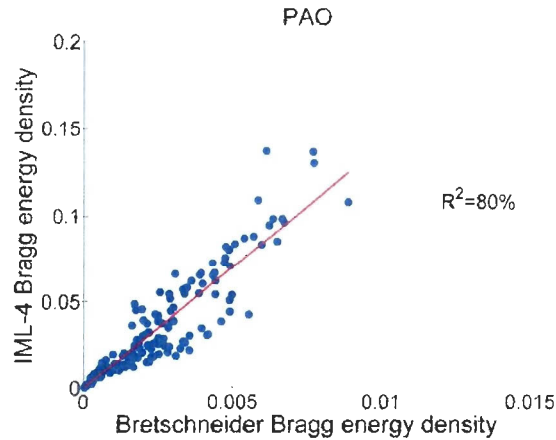


Figure 13 : Observed Bragg energy densities from IML-4 buoy versus estimated Bragg energy densities from theoretical two-parameter wave Bretschneider's spectrum, with correlation coefficients squared ( $R^2$ ) obtained for each site

The scatterplots obtained in Figure 14 showing HFRs daily coverage versus estimated Bragg energy densities are very similar to those shown in Figure 11, confirming that HFRs daily coverage in ice-free conditions can be estimated from Bragg energy densities. To do so, HFRs coverages have been nonlinearly least-square fitted to estimated Bragg energy densities using the Matlab function «lsqcurvefit» (figure 14).

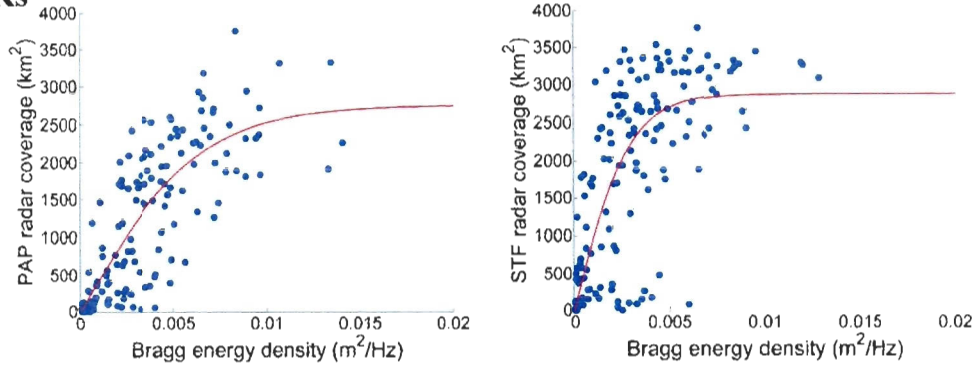
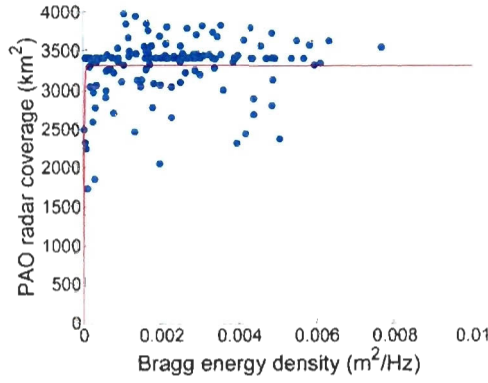
**CODARs****WERA**

Figure 14 : HFR coverage versus Bragg energy density calculated from theoretical spectrum for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). Red lines are the fitted relationships (Equation 6 and Table 2)

The fit equation chosen is

$$A_m = a \times \tanh(S/S_0) \quad (6)$$

where  $A_m$  is the daily coverage,  $a$  and  $S_0$  are the coefficients computed by the «lsqcurvefit» function (Table2), and  $S$  is the Bragg energy density estimated by Equation 5.

Table 2 : Coefficients of the radar coverages nonlinear least-square fit to Bragg energy densities for the three HFRs

	CODARs		WERA
	PAP	STF	PAO
$a \text{ (km}^2\text{)}$	$2.74 \times 10^3$	$2.88 \times 10^3$	$3.31 \times 10^3$
$S_0 \text{ (m}^2\text{/Hz)}$	$6.31 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$0.03 \times 10^{-3}$

The fit equation is used to estimate an expected ice-free coverage for each HFR during winter 2013 using predictions of significant wave height and peak period from the parametric wave model GENER and the Bretschneider's spectrum (Equation 5). This expected ice-free coverage is then used to normalize the actual coverage of HFR in presence of sea ice.

### ***GENER predictions***

In order to separate the effects of wind and sea ice on HFR coverage, we need predictions of waves in the absence of sea ice during winter 2013. We used a simple fetch model called GENER (Desjardins and Ouellet 1984; Ruest *et al.* 2013).

Wind speed predicted by the GEM model of Environment Canada has been used to force GENER during winter 2013 at three positions, each in the corresponding polar grid of the HFR coverage: the IML-4 buoy coordinates (48.67°N, 68.58°W) for PAP, (48.75°N, 68.31°W) for STF and (48.97°N, 68.42°W) for PAO (Figure 7). Figure 15 shows the predicted significant wave heights and peak periods.

Waves predicted by GENER are very similar at the three positions, confirming that using a single position for each HFR is sufficient to represent wave conditions over the entire observational area.

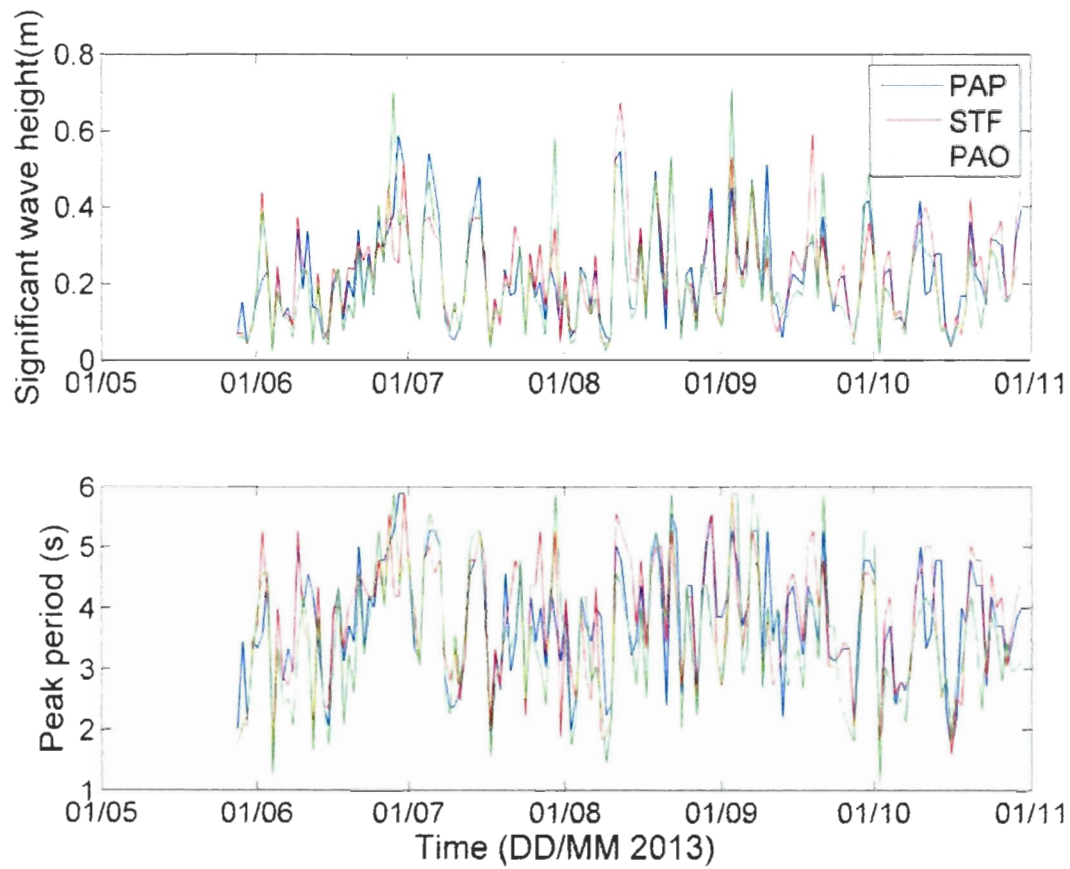


Figure 15 : Predicted significant wave heights (top panel) and peak periods (bottom panel) time series for the three HFR sites PAP (in blue), STF (in red) and PAO (in green)

To validate GENER predictions, hourly Bretschneider spectra have been generated using wave heights and periods predicted by GENER. Wave spectra were then daily averaged throughout the period from May to October when IML4 buoy was operational. Daily significant wave heights and peak periods were then calculated from the daily wave energy spectra and compared to the observed data (Figure 16).

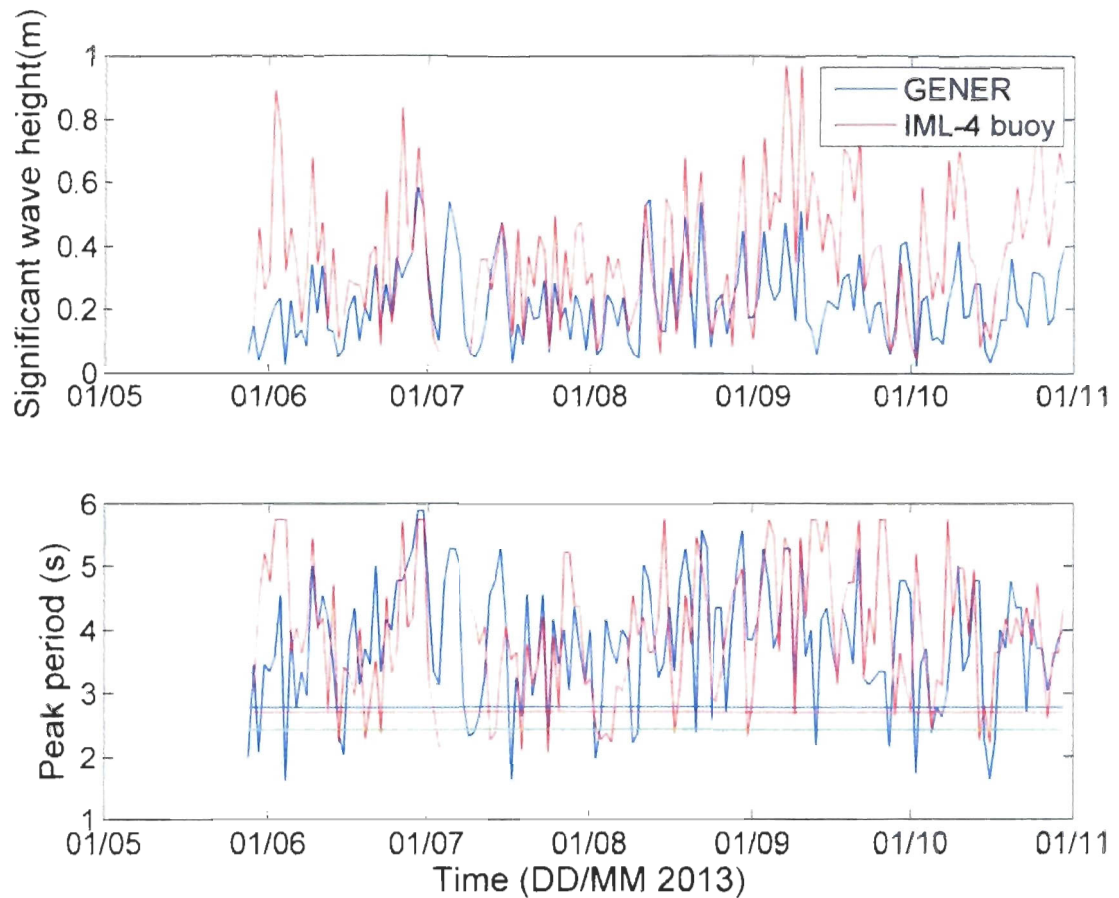
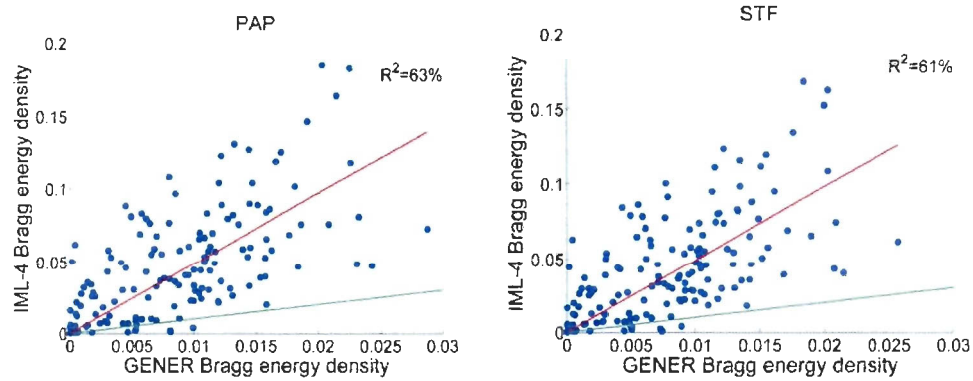


Figure 16 : Comparison between predicted (in blue) and measured (in red) significant wave heights (top panel) and peak periods (bottom panel), with HFRs Bragg periods shown with dashed lines (PAP: blue, STF: red, PAO: green)



Significant wave heights predicted by GENER underestimate the observed heights, but temporal variability is similar. Peak periods have a similar range, but temporal variability is less well predicted by GENER than for significant wave heights. However, these wave parameters are not directly used to estimate the HFRs coverage in ice-free conditions. We therefore computed Bragg energy densities from the daily-averaged spectra predicted by GENER using the theoretical Bretschneider spectrum, and compared them with measured daily-averaged data (Figure 17).

### CODARs



### WERA

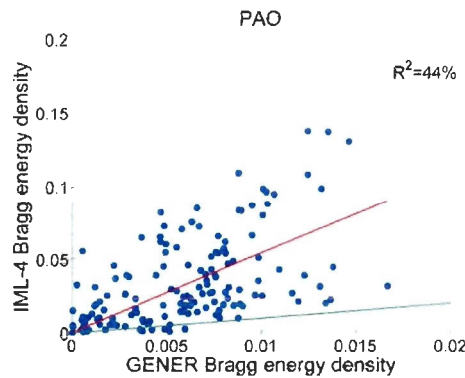


Figure 17 : Observed versus predicted Bragg energy densities for CODARs (top panels) and WERA (bottom panel). Linear fitted relationships are shown in red and the 1:1 lines are shown in green

There are relationships ( $R^2 \geq 40\%$ ) between predicted and observed Bragg energy densities for all HFRs. GENER underestimates measured Bragg energy densities so linear relationships were least-square fitted to obtain correction coefficients (Table3) to apply to GENER predicted Bragg energy density in winter:

$$S_{ob} = k S_p \quad (7)$$

where  $S_{ob}$  is the observed Bragg energy density,  $k$  is the correction coefficient given in Table 3 and  $S_p$  is the Bragg energy density predicted by the model GENER.

Table 3 : Correction coefficients to apply to predicted Bragg energy densities for the three HFRs

	CODARs		WERA
	PAP	STF	PAO
<i>k</i>	4.84	4.9	5.4

#### ***Ice coverage over wind fetches***

To take into account the effect of sea ice on waves, sea ice concentration obtained from the Canadian operational ice-ocean forecasting system (through the OGSL web portal) were averaged over wind fetches, depending on the daily mean wave direction predicted by GENER.

As in the GENER model, 16 wind directions were considered, from 0 to 360 degrees in steps of  $22.5^\circ$ . For the 16 different wind directions, the area of the fetch of the wind encompassing the HFR maximum coverage area was determined, for each site. Figure 18 shows examples of two different wind fetches (plotted in blue and yellow) determined for two different wind directions relative to STF maximum coverage area (plotted in red).

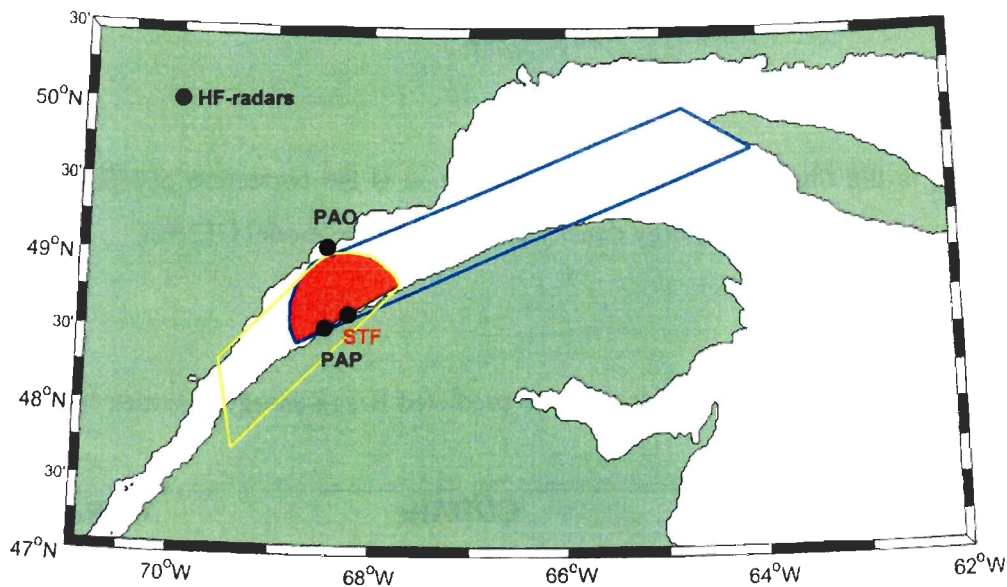


Figure 18 : Examples of two different wind fetches (in blue and yellow) determined for STF maximum radar coverage (in red)

Then hourly predictions of wave direction from GENER were daily averaged throughout winter. These daily averaged directions were used to determine which fetch area from the 16 calculated to use for spatially averaging the daily-averaged ice concentration.

Nevertheless, during winter, ice melts and reforms alternately according to air and sea surface temperature and wind conditions. Before sea ice consolidates and emerges from the water surface as gray-white brash or floes, ice crystals form in the water which are mixed down to a certain depth (a few tens of centimeters typically) depending on the wave

activity. This is called frazil ice and this type of ice does not appear explicitly in ice analyses or in models. Frazil can however affect the HFR current measurements by attenuating ocean waves, decreasing the wave generation rate by the wind and decreasing the surface skin salinity.

The ice concentration provided by the Canadian operational ice-ocean forecasting system does not represent frazil. We thus used ice charts and considered that areas with ice concentration less than 1/10 were potential areas with frazil ice that might contribute to decrease the skin surface salinity, i.e. the salinity of the first centimeters which affect the propagation of HFR EM waves. So we looked for the possibility of frazil using Canadian Ice Service charts for each day of the period of experiment. When ice concentration was lower than 1/10 (Figure 19 in blue) we qualified the area as potentially containing frazil.

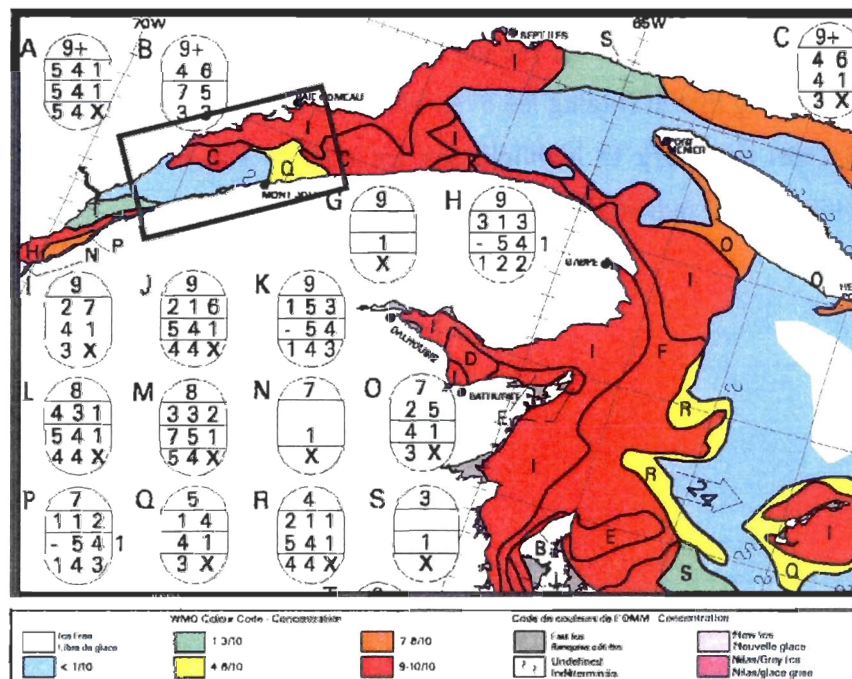


Figure 19 : Example of a Canadian Ice Service chart showing open water (blue) areas in the LSLE with less than one tenth ice concentration where frazil ice might be present. The field of experiment is shown by the black rectangle

### ***HFR coverage versus ice concentration averaged over wind fetches***

For both HFR types CODAR (PAP, STF) and WERA (PAO), the daily HFR currents coverage  $A_i$  obtained during winter 2013 has been normalized by the estimated ice-free coverage  $A_m$ . As a first step, this normalized HFR coverage  $\Gamma = A_i/A_m$  has been plotted versus the daily-averaged concentration of sea ice spatially-averaged over the entire observational area shown in Figure 7 (Figure 20 a,c,e). The relationship is still not clear for CODARs. The normalized coverage  $\Gamma$  sometimes exceeds 1 because Equation 6 used to estimate the expected ice-free coverage is a fit to data with a strong scatter (Figure 14). As a second step, the normalized HFR coverage has been plotted versus ice concentration averaged over wind fetch areas (Figure 20 b,d,f), leading to a clearer relationship ( $R^2 \geq 67\%$ ) between the radar performance and sea ice concentration. Figure 20 a,c,e is very similar to figure 10, so the normalisation of the winter coverages by the estimated radars coverages in ice-free conditions could not isolate the ice effect. However, figure 20 b,d,f shows clearer relationship, showing that averaging ice over wind fetches instead of only the area covered by the HFRs was necessary to highlight sea ice effects. The normalization is however required to compare HF radars operating at different frequencies.

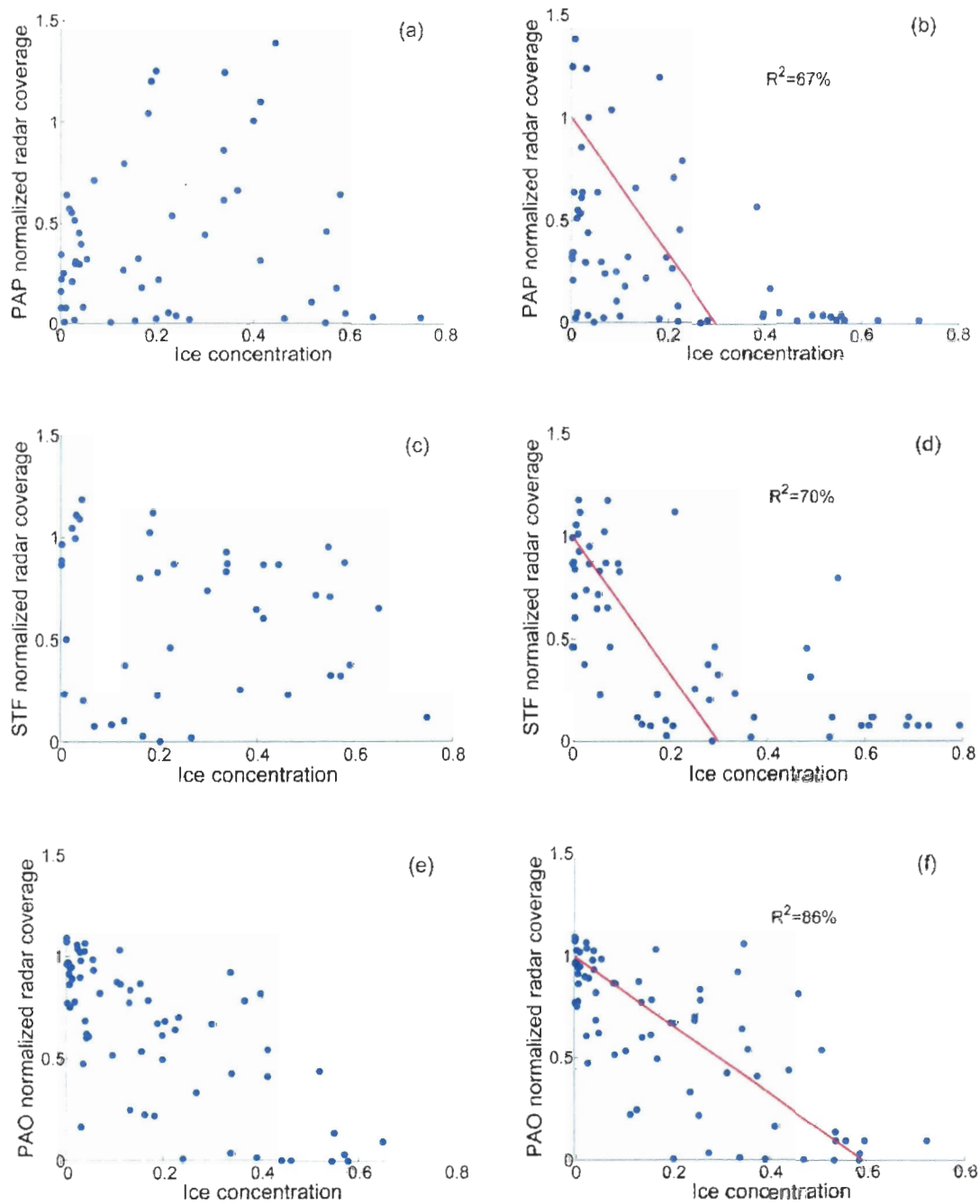


Figure 20 : CODARs (a,b,c,d) and WERA (e,f) HFR normalized coverage ( $\Gamma$ ) versus ice concentration before (left) and after (right) averaging ice data over wind fetches. Least-square fitted linear relationships are shown by red lines

A linear relationship was least-square fitted to the data in figure 20 b,d,f (one fit for combined CODARs data from PAP and STF) but scatter around the fit is large. The fit equations are:

$$\Gamma_{CODAR} = 1 - 3.35 C \quad (8)$$

$$\Gamma_{WERA} = 1 - 1.7 C \quad (9)$$

where  $\Gamma$  is the normalized HFR coverage area and  $C$  is the daily ice concentration averaged over wind fetches.

However there are numerous days when HFRs, mainly CODARs, could not measure currents even when the ice concentration was low (less than 0.1). To explain it, we attempted to examine the effect of the possible presence of frazil on radars measurements since frazil is not taken into account in ice concentration predicted by the Canadian operational ice-ocean forecasting system.

### ***Frazil effect***

In the same scatterplots showing HFR normalized coverage versus the daily averaged ice concentration over wind fetches, points have been separated in circles for days when frazil can be present and squares for frazil-free days in the study area (Figures 21 and 22). In addition, points have been colored according to daily averaged wind direction, which could have an impact on frazil accumulation along the coasts.

a. CODARs

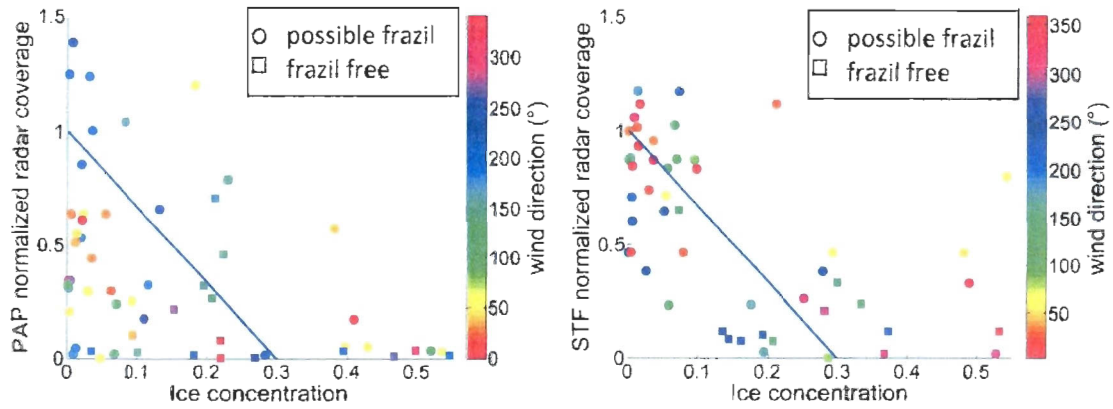


Figure 21 : As Figure 20 (right) with frazil-free (squares) or possibility of frazil (circles) and wind direction (color) indicated. Least-square fitted linear relationship is shown by blue lines (Equation 8)

Most of the points with small coverage for low ice concentration correspond to conditions with potential for frazil, which could therefore be an explanation for the small radar coverage mainly for PAP. We have already mentioned that sea surface salinity affect our EM waves over the depth of 8-9 cm (Equation 1). This shallow depth reinforces the potential effect of frazil. However, there are no preferred wind directions for these points. Confirmation of the potential effect of frazil on radar coverage would require direct observations of frazil.



## b. WERAs

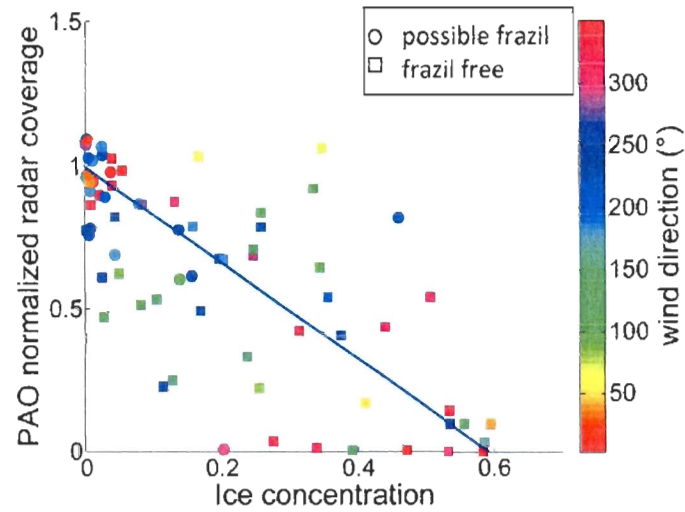


Figure 22 : As Figure 21 but for WERA HFR (PAO). Least-square fitted linear relationship is shown by the blue line (Equation 9)

For WERAs, only few days have small coverage at low ice concentration, and they correspond to frazil-free conditions and no particular wind direction.

## 1.5. DISCUSSION AND CONCLUSION

### 1.5.1. Parameters affecting both HFR types measurements

For both types of HFR, performance decreases with increasing sea ice concentration during winter 2013 (Figures 21 and 22). Furthermore, normalized coverage is sometimes small for CODARs when sea ice concentration is close to zero and this may be due to the presence of frazil, or landfast ice along the coast in front of the instrument, which was not monitored during this study. Indeed, backscattering of the signal transmitted by the HF radar is due to the short ocean waves which are rapidly damped by sea ice, suppressing the constructively-interfering return signal. Moreover, the presence of sea ice limits the wind fetch over adjacent open waters, therefore limiting the development of Bragg waves for a given wind speed and duration (WMO 1998).

A linear relationship between radar coverage and sea ice concentration was least-square fitted to data, but the scatter around the fit is very large. This may be due to uncertainties in our normalization method (large scatter around the relationship between ice-free radar coverage and Bragg energy density, see Figure 14; uncertainties in GENER Bragg energy density predictions, see Figure 17), to ambient radio noise variability, and to sea surface salinity variability (Crombie 1955; Potter and Weingartner 2010; Gurgel *et al.* 1999b; Barrick and Long 2006).

### 1.5.2. HFR types differences

The fact that CODARs and WERA were operating at different frequencies, hence required different Bragg wavelengths (Table 1), has been taken into account by computing the wave energy at the Bragg frequencies of each radar.

We found that WERA was virtually insensitive to the Bragg wave energy density, contrary to CODARs (Figure 14). Furthermore, the equations obtained relating HFR

normalized coverage to the ice concentration show that CODAR coverages are more reduced by the presence of ice than WERA's, with a reduction coefficient of 3.35 for CODARs and 1.7 for WERA (equations 8 and 9). These differences may be due to the fact that our WERA has 12 receive antennas that are combined together in beamforming, and is therefore able to achieve a better signal-to-noise ratio than CODARs with their 3-element single receive antenna.

Despite the various limitations of our study (predicted rather than observed sea ice concentration, simple parametric wave model to predict expected ice-free Bragg energy densities in winter), it is the first study to quantify experimentally the relationship between HFR coverage and sea ice concentration. Empirical relationships between the HFR coverage and environmental parameters (wind and sea ice) will allow predicting coverage that could be provided by HFR installed in other seasonally ice-covered areas.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a permis de quantifier expérimentalement, pour la première fois, la performance de deux types de radars HF (CODAR et WERA) en fonction de la concentration de glace de mer dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. L'objectif était de caractériser la couverture des radars HF pour la mesure des courants à la surface de la mer en présence de glace de mer, pendant l'hiver 2013, en fonction du type de radar HF, de la concentration de la glace de mer, et de la densité d'énergie des vagues de Bragg (qui dépend de la radiofréquence utilisée). Une simple comparaison entre la moyenne journalière de la couverture de glace sur toute la zone d'observation et chacune des couvertures des courants mesurés par les radars HF des trois sites (PAP, STF et PAO) n'a pas permis de dégager une relation claire entre concentration de glace de mer et couverture des radars. Cette dernière dépend en effet de plusieurs autres paramètres environnementaux, notamment le vent. Par conséquent, nous avons développé une méthode de normalisation de la couverture journalière hivernale en présence de glace de mer par une couverture journalière estimée en absence de glace de mer dans les mêmes conditions de vent. Etant donné que la couverture des radars est essentiellement établie par la rétrodiffusion du signal EM par les vagues de Bragg, la densité d'énergie des vagues aux fréquences de Bragg de chaque radar HF a été calculée puis comparée directement à la couverture radar correspondante. Cette relation a permis l'estimation de la couverture journalière en absence de glace. Les CODARs étaient plus sensibles à la densité d'énergie de Bragg que les WERAs.

La couverture des radars en présence de glace normalisée par la couverture estimée en absence de glace a été comparée à la concentration journalière de glace de mer moyennée sur les fetchs du vent correspondants à la direction moyenne journalière des

vagues. Pour les deux types de radars, l'effet de la glace de mer est apparu plus clairement et la couverture du radar diminue nettement avec la croissance de la concentration de glace. En effet, les ondes radars électromagnétiques de surface s'atténuent plus rapidement au-dessus de la glace que de l'eau de mer (Gurgel *et al.* 1999), de plus les vagues de courtes périodes, responsables de la rétrodiffusion du signal, sont rapidement atténuées par la glace de mer. Par ailleurs, la présence de glace de mer limite le fetch du vent sur les eaux ouvertes adjacentes, ce qui limite le développement des vagues de Bragg pour une vitesse et une durée de vent données (WMO 1998). La couverture normalisée des CODARs était parfois réduite pour des faibles concentrations de glace et cela pourrait être expliqué par la possibilité de présence de frasil. En effet, le frasil pourrait affecter les mesures des radars HF en atténuant les vagues de surface, en agissant sur le processus de génération des vagues par le vent et en réduisant la salinité de la couche de surface.

La concentration journalière de la glace de mer moyennée sur les fetchs du vent réduisait la couverture de courants des CODARs avec un coefficient de l'ordre de 3,35 et celle des WERAs avec un coefficient de 1,7. La différence de réponse des deux systèmes à la densité d'énergie de Bragg et à la concentration de glace pourrait être due au fait que le WERA utilise 12 antennes de réception dont les signaux sont combinés par la technique de *beamforming*, ce qui lui permet d'atteindre un meilleur rapport signal/bruit que les CODARs avec leur unique antenne de réception formée de trois éléments.

### **Limites et perspectives :**

Il faut prendre en considération que les données provenant des modèles pendant la période hivernale peuvent comporter une certaine marge d'erreur, notamment les prévisions des paramètres de vagues par le modèle GENER, ainsi que les données de glace prédites par le système canadien opérationnel de prévisions glace-océan. D'autre part, la résolution du modèle de glace est de 5 km, ce qui empêche la prise en compte de la glace côtière qui peut atténuer rapidement les ondes radios. Des observations photographiques automatisées près des sites radars pourraient permettre de combler cette lacune. La quantification du

frasil reste aussi approximative, estimer la quantité de frasil et sa variabilité sera essentielle pour la confirmation des hypothèses.

Puisque la salinité de l'eau ne peut affecter les ondes EM de nos radars que sur une profondeur de 8-9 cm (Barrick et Long 2006, Equation 1), et que la salinité si proche de la surface est très difficile à mesurer, nous n'avons pas pu quantifier l'effet de la salinité sur les couvertures des radars.

Contrairement à notre première hypothèse, on a pu montrer que la performance d'un radar HF est peu affectée par la présence de la glace de mer dans le domaine d'observation, mais est affectée par la présence de glace de mer en dehors du domaine lorsque la glace de mer limite suffisamment le fetch du vent, validant ainsi notre deuxième hypothèse. Nous avons pu aussi valider notre dernière hypothèse en montrant que la couverture des radars HF diminue avec l'augmentation de la concentration de glace de mer.

Avec le recul de la banquise dans les régions polaires, le déploiement des radars HF présente un atout stratégique. En effet, les radars HF permettent de mesurer non seulement les courants marins, mais aussi les vagues (e.g. Graber et Heron 1997), la direction du vent (e.g. Fernandez *et al.* 1997), et la vitesse de déplacement de la banquise (Lipa *et al.* 1986). La tendance linéaire entre les couvertures normalisées et la concentration de glace moyennée sur les fetchs (équations 8 et 9) permettra de prédire les couvertures des courants de radars HF déployés dans d'autres régions maritimes ou estuariennes en présence partielle de glace de mer.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barrick, D. E., W. Evans and B. L. Weber. 1977. Ocean surface currents mapped by radar. *Science*, **198**: 138–144.
- Barrick, D. E. 1978. HF Radio Oceanography-A Review. *Boundry Layer Meteorol*, **13**: 23-43.
- Barrick, D. E., B. J. Lipa and R. D. Crissman. 1985. Mapping Surface Currents with CODAR. *Sea Technology*, **26**:43-48.
- Barrick, D. E. and B. J. Lipa. 1997. Evolution of bearing determination in HF current mapping radars. *Oceanography*, **10**: 72–75.
- Barrick, D. E. and R. Long. 2006. How Salinity Affects Radar Performance: A Case Study of 24 MHz HF Radar Performance in San Francisco Bay During the 2006 New Year Storm Floor. White Paper. 7p.
- Bjorkstedt, B. and J. Roughgarden. 1997. Larval Transport and Coastal Upwelling: An Application of HF Radar in Ecological Research. *Oceanography*, **10**: 64-67.
- Bretschneider, C. L. 1959. Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves. Tech. Memo. No. 118. Beach Erosion Board, US Army Corps of Eng., Washington, DC.
- Broche, P., J. C. Crochet, J. L. de Maistre and P. Forget. 1987. VHF radar for ocean surface current and sea state remote sensing. *Radio Science*, **22** : 69-75.
- Chapman, R. D. and H. C. Graber. 1997. Validation of HF Radar Measurements. *Oceanography*, **10** (2): 76-79.



- Chapman, R. D., L. K. Shay, H. C. Graber, J. B. Edson, A. Karachintsev, C. L. Trump and D. B. Ross. 1997. On the accuracy of HF radar surface current measurements: Intercomparison with ship-based sensors. *J. Geophys. Res.*, **102** (C8): 18737–18748.
- Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch, and A. Staniforth. 1998. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model: Part I - Design considerations and formulation, *Mon. Wea. Rev.*, **126**: 1373-1395.
- Crombie, D. D. 1955. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc./s. *Nature*, **175**:681-682.
- Desjardins, L. and Ouellet, Y., 1984. Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes. *Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique, dans le cadre du 52e congrès annuel de l'ACFAS*, 187–224.
- Drapeau, G. 1992. Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire.*, **46**, (2): 233-242, doi: 10.7202/032907ar. URI: <http://id.erudit.org/iderudit/032907ar>
- Dumont, D., A. Kohout, and L. Bertino. 2011. A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *J. Geophys. Res.*, **116** (C04001), doi:10.1029/2010JC006682.
- Dzvonkovskaya, A., K.-W.Gurgel, H. Rohling and T. schlock. 2009. HF Radar WERA Application for Ship Detection and Tracking. *European Journal of Navigation*, **7**(3):18-25.
- El-sabh, M. I. and N. Silverberg. 1990. The St.Lawrence Estuary: Introduction. *In Oceanography of a Large-Scale Estuarine system: The St.Lawrence*, sous la direction de El-sabh, M. I. et N. Silverberg, **39**: 1-6. New Yorkk: Springer-Verlag.

- Ingram, R. G. and M.I. El-Sabh. 1990. Fronts and Mesoscale Features in the St Lawrence Estuary. In *Oceanography of a Large-scale Estuarine System: the St. Lawrence. Coastal and Estuarine Studies*, **39**:71-93. New York: Springer-Verlag.
- Emery, B. M., L. Washburn and J. A. Harlan. 2004. Evaluating Radial Current Measurements from CODAR High-Frequency Radars with Moored Current Meters. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **21**: 1259–1271.
- Essen, H. -H., K. -W. Gurgel and T. Schlick. 2000. On the Accuracy of Current Measurements by Means of HF Radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **25**: 472-480.
- Fernandez, D. M., H. C. Graber, J. D. Paduan and D. E. Barrick. 1997. Mapping Wind Direction with HF Radar. *Oceanography*, **10** (2):93-95.
- Flocco, D., P. Falco, P. Wadhams, and G. Spezie. 2003. Surface current measurements in Terra Nova Bay by HF radar. *Antarctic Science*, **15** : 55-62.
- Galbraith, P. S., J. Chassé, P. Larouche, D. Gilbert, D. Brickman, B. Pettigrew, L. Devine and C. Lafleur. 2014. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2013. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2014/062. vi + 84 p.
- Graber, H. C. and C. B. Limouzy-Paris. 1997. Transport patterns of tropical reef fish larvae by spin-off eddies in the Straits of Florida. *Oceanography*, **10**: 68–71.
- Graber, H. C. and M. L. Heron. 1997. Wave height measurement from HF radar. *Oceanography*, **10**: 90–92.
- Gurgel, K. -W., H. -H. Essen and F. Schirmer. 1986. CODAR in Germany - a status report valid November 1985. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **11**: 251-257.
- Gurgel, K. -W., H. -H. Essen and S.P. Kingsley. 1999a. HF radars: physical limitations and recent developments. *Coastal Engineering*, **37**: 201–218.

- Gurgel, K. -W., G. Antonischki, H. -H. Essen and T.Schlick. 1999b. Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing. *Coastal Engineering*, **37**: 219–234.
- Gurgel, K. -W. and H. -H. Essen. 2000. On the performance of a ship-borne current mapping HF radar. . *IEEE J. Ocean. Eng.*, **25** (1): 183-191.
- Haus, B. K., H. C. Graber and L. K. Shay. 1997. Synoptic Measurements of Dynamic Oceanic Features. *Oceanography*, **10** (2): 45-48.
- Heron, M. L. 1987. Directional spreading of short wavelength fetch-limited wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**: 281-285.
- Heron, M. L. and D. P. Atwater. 2013. Temporal and Spatial Resolution of HF Ocean Radars. *Ocean Science Journal*, **48**: 99-103.
- Hickey, K., R. H. Khan and J. Walsh. 1995. Parametric estimation of ocean surface currents with HF rada. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **20**: 139-144.
- Khan, R. H. and D. K. Mitchell. 1991. Waveform analysis for high-frequency FMCW radar. *Geophysical Research Letters*, **17**:1097-1100.
- Lipa, B. J. and D.E. Barrik. 1986. Extraction of sea state from HF radar sea echo:Mathematical theory and modeling. *Radio Science*, **21** :81-100.
- Lipa, B. J., R. D. Crissman, and D.E. Barrik. 1986. HF radar observations of Arctic pack-ice breakup. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **11**: 270-275.
- Mertz. G. and Y.Gratton. 1990. Topographic Waves and Topographically Induced Motions in the St.Lawrence Estuary. In *Oceanography of a Large-Scale Estuarine system: The St.Lawrence*, sous la direction de El-sabh, M. I. et N. Silverberg, **39**: 94-108. New Yorkk: Springer-Verlag.

- Ochi, M. K. 1998. Ocean Waves, the Stochastic Approach. Cambridge Univ. Press, 319 pp. p36
- Paduan, J. D. and L. K. Rosenfeld. 1996. Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore-based HF radar (Coastal Ocean Dynamics Application Radar). *Journal of Geophysical Research*, **101**: 20669-20686.
- Paduan, J. D. and H. C. Graber. 1997. Introduction To High-Frequency Radar: Reality and Myth. *Oceanography*, **10**: 36-39.
- Paduan, J. D. and M. S. Cook. 1997. Mapping Surface Currents in Monterey Bay with CODAR-Type HF Radar. Unpublished.
- Paduan, J. D. and L. Washburn. 2013. High-Frequency Radar Observations of Ocean Surface Currents. *Annual Review of Marine Science.*, **5**:115-136.
- Peters, N. J. and R. A. Skop. 1997. Measurements of Ocean Surface Currents from a Moving Ship Using VHR Radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**: 676-694.
- Prandle, D., S. G. Loch and R. Player. 1993. Tidal flows through the Straits of Dover. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**: 23–37.
- Potter, R. and T. Weingartner. 2010. Surface circulation radar mapping in Alaskan coastal waters: Beaufort sea and Cook Inlet. Report, University of Alaska, Fairbanks, 164pp.
- Ruest, B., U. Neumeier, D. Dumont and A. Lambert. 2013. Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model. Proceedings of *Coastal Dynamics 2013*, SHOM, Brest (France). 1363-1374.
- Saucier, F. J., F. Roy and D. Gilbert. 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *J. Geophys. Res.*, **108** (C8).
- Schmidt, R. O. 1986. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-34**: 276–280.

- Shearman, E. D. R. and M. D. Moorhead. 1988. Pisces: A coastal ground-wave radar for current, wind and wave mapping to 200km ranges. *Proc. IGARSS'88*, Edinburgh, United Kingdom, IEEE, 773–776.
- Smith, G. C., F. Roy and B. Brasnett. 2012. Evaluation of an operational ice–ocean analysis and forecasting system for the Gulf of St Lawrence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* DOI:10.1002/qj.1982
- Squire, V. A. 2007. Review Of ocean waves and sea-ice revisited. *Cold Regions Science and Technology*, **49**: 110–133.
- Teague, C. C., J. F. Vesecky and D. M. Fernandez. 1997. HF Radar Instruments, Past to Present. *Oceanography*, **10**:40-44.
- Whelan, C., L. Meadows, D. Barrick, R. Kroodsmas, and C. Ruf, 2011: Great Lakes HF Radar Experiment May 9 to 20, 2011: Report to the Great Lakes Observing System, 19 pp.
- WMO (World Meteorological Organization) .1998. Guide to wave analysis and forecasting. Report 702, 168 pp.



